



Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação - FEEC

Departamento de Sistemas e Controle de Energia - DSCE

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS E TRANSITÓRIOS
ELETROMAGNÉTICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
COMPOSTAS POR TORRES COM ALTURA ELEVADA**

Autor: André Jinno Gomes Pinto

Orientador: Prof. Dr. José Pissolato Filho

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. José Pissolato Filho – DSCE/FEEC/UNICAMP – Presidente

Prof. Dr. Sérgio Kurokawa – FEIS/UNESP

Dr. Fernando Zago – DSCE/FEEC/UNICAMP

Campinas, 7 de abril de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

P658a Pinto, André Jinno Gomes
Análise dos parâmetros elétricos e transitórios
eletromagnéticos de linhas de transmissão compostas por
torres com altura elevada / André Jinno Gomes Pinto. --
Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: José Pissolato Filho.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Linhas elétricas - Transmissão. 2. Linhas elétricas
- Postes e torres. 3. Torres. 4. Transitórios
(Eletricidade). I. Pissolato Filho, José. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica
e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Analysis of the electrical parameters and electromagnetic
transients of transmission lines consisting of towers with high
height

Palavras-chave em Inglês: Electrical lines - Transmission, Electric lines - Poles
and towers, Towers, Transients (Electricity)

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Sérgio Kurokawa, Fernando Zago

Data da defesa: 07/04/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: André Jinno Gomes Pinto

Data da Defesa: 7 de abril de 2011

Título da Tese: "Análise dos Parâmetros Elétricos e Transitórios Eletromagnéticos de Linhas de Transmissão Compostas por Torres com Altura Elevada"

Prof. Dr. José Pissolato Filho (Presidente):

Prof. Dr. Sérgio Kurokawa:

Dr. Fernando Zago:

Agradecimentos

- Agradeço aos meus pais Anibal Luis e Mary Hiroko, ao meu irmão Daniel, pelo apoio incondicional, incentivo e ajuda ao longo de toda a minha vida;
- Ao Professor José Pissolato Filho, tanto pelo apoio acadêmico e profissional como pelo companheirismo;
- Aos amigos do Laboratório de Alta Tensão da Unicamp, pela colaboração e convívio ao longo desse trabalho (Marcus, Brito, Daiana);
- Aos meus amigos Virgílio e Renato pelo convívio e apoio desde o início da graduação;
- Meus agradecimentos especiais ao Eduardo que sempre esteve ao meu lado, tanto na concepção como no desenvolvimento, para que esse trabalho fosse possível;
- Ao Humberto pela ajuda na formatação e revisão;
- A Raira pela companhia e carinho nos momentos difíceis;
- Exponho minhas estimas por todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram neste trabalho;
- Ao programa de pós-graduação da Unicamp, pela estrutura e apoio para realização desta dissertação;
- Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

As redes de transmissão de energia elétrica estão entre as grandes contribuições que a engenharia ofereceu à civilização moderna. Se tornando aparentes, pelas expressivas linhas de transmissão de alta tensão apoiadas sobre elevadas torres de aço que cruzam o território nacional em todas as direções. No corrente trabalho tem-se por objetivo tratar das alternativas não-convencionais de transmissão de energia elétrica. Comparando o desempenho dessas novas estruturas com o comportamento das estruturas atualmente utilizadas no sistema de transmissão convencional. Para tal são descritos alguns dados da atual configuração do sistema de transmissão nacional. Ademais, breves descrições técnicas serão apresentadas sobre os principais componentes de linhas de transmissão convencionais, tais como: condutores múltiplos, isoladores e anéis anti-corona. Tais definições serão introduzidas com o âmbito de proporcionar uma maior familiaridade com o tema em estudo. Uma análise minuciosa é traçada no cálculo dos parâmetros elétricos na frequência, seguido de um estudo dos transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo. Causados por sinais de tensão aplicados a entrada das linhas de transmissão.

Abstract

The transmission of electric energy is among the great contributions that engineering offered to modern civilization. Becoming apparent, by the expressive lines of high voltage transmission supported on large steel towers that crisscross the country in all directions. In the current work has been aimed at dealing with alternative non-conventional electric power transmission. Comparing the performance of these new structures with the behavior of the structures currently used in conventional transmission system. For such thing are described some of the current configuration of the national transmission system. In addition, brief technical descriptions are presented on the main components of conventional transmission lines, such as multiple conductors, insulators and anti-corona rings. Such definitions will be introduced to the scope of providing a greater familiarity with the subject under study. A detailed analysis is plotted on the calculation of electrical parameters on frequency, followed by a study of electromagnetic transient time domain. Caused by voltage signals applied to the input of the transmission lines.

Sumário

Trabalhos Publicados pelo Autor	xiii
Capítulo 1 Linhas de Transmissão de Energia Elétrica.....	1
1.1 Um Breve Histórico	1
1.2 Sistema de Transmissão Brasileiro	3
1.3 Descrição e Especificação das Linhas de Transmissão.....	5
1.3.1 Condutores Múltiplos	8
1.3.2 Isoladores	9
1.3.3 Anéis Anti-Corona	10
1.4 Conclusão	11
Capítulo 2 Tecnologias de Transmissão de Energia Elétrica.....	13
2.1 Introdução.....	13
2.2 Linha com Potência Natural Elevada e Compacta.....	13
2.3 Linha de Transmissão com Torre de 350 metros.....	17
2.4 Conclusão	19
Capítulo 3 Cálculo dos Parâmetros Elétricos de Linhas Aéreas de Transmissão	21
3.1 Introdução.....	21
3.2 Impedâncias Longitudinais da Linha	21
3.2.1 Impedância Externa.....	22
3.2.2 Impedância Interna Devido ao Efeito Pelicular (Skin Effect)	25
3.2.3 Impedância Devido ao Efeito do Solo.....	34
3.2.4 Impedância Longitudinal Total da Linha	37
3.3 Admitâncias Transversais da Linha	38
3.4 Conclusões.....	42

Capítulo 4	Análise Comparativa dos Parâmetros Elétricos da Linha Convencional e da Linha Não-Convencional no Domínio da Frequência.....	43
4.1	Introdução.....	43
4.2	Parâmetros Longitudinais Próprios.....	44
4.3	Parâmetros Longitudinais Mútuos.....	55
4.4	Parâmetros Transversais.....	69
4.5	Parâmetros Longitudinais e Transversais em Sequência de Fase.....	70
4.6	Análise das Características de Propagação	76
4.7	Conclusão	85
Capítulo 5	Comportamento de Linhas de Transmissão Convencional e Não-Convencional no Domínio do Tempo.....	87
5.1	Introdução.....	87
5.2	Análises para Sinal Degrau	88
5.2.1	Receptor em Aberto	88
5.2.2	Receptor em Curto-Circuito	96
5.3	Análise para Sinal de Entrada Exponencial.....	102
5.3.1	Receptor em Aberto	103
5.3.2	Receptor em Curto-Circuito	110
5.4	Conclusão	117
Capítulo 6	Conclusão e Trabalhos Futuros.....	119
	Referências Bibliográficas	123

Trabalhos Publicados pelo Autor

A. J. G. Pinto, E. C. M. Costa, S. Kurokawa and J. Pissolato, “Introduction of a Non-Conventional Solution for Amazon Transmission System: Analysis of the Electric Aspects”, *PES/IEEE General Meeting*, Detroit, Michigan, EUA, July 2011.

A. J. G. Pinto, E. C. M. Costa, S. Kurokawa and J. Pissolato, “Non-Conventional Solution for the Amazon Transmission System: Analysis of the Electric Characteristics”, *Electric Power Components & Systems (Taylor & Francis)*, 2011. (Aceito para publicação).

Capítulo 1 Linhas de Transmissão de Energia Elétrica

1.1 Um Breve Histórico [1,2]

As redes de transmissão de energia elétrica estão entre as grandes contribuições que a engenharia ofereceu à civilização moderna. Se tornando aparentes, pelas expressivas linhas de transmissão de alta tensão apoiadas sobre elevadas torres de aço que cruzam o território nacional em todas as direções. Transportando milhares de megawatts de energia, estas linhas interligam as estações geradoras distantes com os centros urbanos de carga ou unem, em sistemas cooperativos, as instalações de produção de energia de grandes áreas geográficas.

Entretanto, somente no final do século XIX foi possível a obtenção de energia elétrica em quantidades razoáveis a partir da energia mecânica. Em 1880, com a invenção da lâmpada incandescente por Thomas A. Edison, é que a energia elétrica teve seu grande impulso. A partir de 1882, quando foi inaugurada a central elétrica de Pearl, fornecendo iluminação pública e energia para motores em parte da cidade de Nova York, começaram a surgir os primeiros sistemas comerciais de eletricidade, em diversos países do mundo. Com eles também tiveram início problemas com o transporte e a distribuição de energia elétrica, então gerada e consumida em corrente contínua. A expansão dos sistemas incipientes e o uso da energia hidráulica eram limitados devido à queda de tensão e ao efeito Joule. Para evitar a utilização de condutores de seções maiores, as centrais elétricas eram construídas relativamente próximas umas das outras. Com isso, o grande potencial hidroelétrico ficava fora de alcance, pois a energia era consumida na tensão em que era produzida, não havendo solução imediata à vista para os problemas de corrente contínua.

Nessa mesma época, o engenheiro francês René Thury projetou um sistema de transmissão em alta tensão em corrente contínua, que já era usado quando os sistemas de corrente alternada davam seus primeiros passos. Seu funcionamento baseava-se na ligação de geradores CC em série, até alcançar a alta tensão desejada, no lado de transmissão de energia. Na recepção, motores CC eram ligados em série com geradores CA. Este sistema, denominado Sistema Thury foi usado entre 1880 e 1911 na Europa principalmente para o aproveitamento hidroelétrico.

Um exemplo de aplicação do Sistema Thury é a ligação entre Mountier, nos Alpes Franceses, e Lyon. Instalado em 1906 com uma extensão de 190 km dos quais 4,5 km eram subterrâneos, teve uma carga inicial de 4,3 MW a 57,6 kV e 76 A chegando posteriormente, com o acréscimo de novos geradores a 19,3 MW, 125 kV e 150 A. A linha manteve-se em operação até 1937 quando foi então retirada de serviço.

Os experimentos de corrente contínua tiveram prosseguimento durante a II Guerra Mundial. Neste período, a Siemens-Schuckertwerke A.G. realizou experiências com linhas de 110 kV na Alemanha. Em 1945, com o fim da Segunda Grande Guerra, os projetos e equipamentos foram levados para URSS como dívida de guerra.

Uma grande quantidade de estudos foi realizada até que em 1954 um cabo submarino ligou a ilha de Gotland, na Suécia, ao continente percorrendo uma extensão de 96 km, levando uma carga de 20 MW a 100 kV em corrente contínua, através de único cabo com retorno pela terra e mar. Esta foi a primeira linha de transmissão CC a entrar em operação comercial. Após esta, diversas outras seguiram seu caminho.

Aos poucos a transmissão em corrente contínua foi cedendo espaço para a utilização de sistemas de corrente alternada. Frente aos problemas citados anteriormente - queda de tensão e efeito Joule - que impediam a transmissão a longas distâncias.

Impulsionada pela invenção de diversos equipamentos, como:

- Transformador, robusto, eficiente, tornou possível a elevação e o abaixamento de tensões CA a níveis de transmissão e distribuição;
- Disjuntores, que em corrente alternada podem ser muito menores e eficientes na proteção de circuitos em caso de sobrecorrentes;
- Motores de indução, especialmente os polifásicos que são simples, baratos, robustos e servem para a maioria das aplicações industriais e residenciais.

O uso de sistemas de corrente alternada ganhou força, pois o problema de transmissão em tensões mais elevadas, portanto com menores perdas de energia, estava resolvido, sendo determinante para a adoção deste modelo de transmissão.

A primeira linha de transmissão de que se tem registro no Brasil foi construída por volta de 1883, na cidade de Diamantina, Minas Gerais. Esta linha transportava energia gerada em uma usina hidroelétrica, constituída de duas rodas d'água e dois dínamos Gramme, a uma distância de 2 km, aproximadamente. A energia transmitida através desta linha acionava bombas hidráulicas em uma mina de diamantes. Consta que era a linha mais longa do mundo, na época. Em 1901, com a entrada em serviço da central Hidroelétrica de Santana do Parnaíba, a então The San Paulo Tramway Light and Power Co. Ltd. construiu as primeiras linhas de seus sistemas de 40 kV. Em 1914, com a entrada em serviço da Usina Hidroelétrica de Utupararanga, a mesma empresa introduziu o padrão 88 kV. Esse padrão de tensão foi, em seguida, adotado pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro, Estrada de Ferro Sorocabana e, através desta, pela USELPA, que futuramente viria a integrar o sistema CESP. Entre 1945 e 1947 construiu-se a primeira linha de 230 kV no Brasil, com um comprimento aproximado de 330 km. Esta linha destinada a interligar os sistemas Rio Light e São Paulo Light, operava inicialmente em 170 kV, passando, em 1950, a operar com 230 kV. Foi também a primeira interligação de dois sistemas importantes realizados no Brasil. Vieram, a partir daí, em rápida sucessão, as linhas de 230 kV do sistema da Cia. Hidroelétrica de São Francisco, 161 e 345 kV da CEMIG e FURNAS, 460 kV da CESP, as linhas de 500 kV de FURNAS e 800 kV do sistema Itaipu [2].

1.2 Sistema de Transmissão Brasileiro

As linhas de transmissão no Brasil são, em sua maioria extensas, devido as grandes distâncias entre as unidades geradoras e os centros de consumo de energia. Hoje o país está quase que totalmente interligado de norte a sul, sendo que somente 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontram-se fora do Sistema Interligado Nacional (SIN), em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica. Nestes locais, o abastecimento é feito por pequenas usinas termelétricas ou por usinas hidrelétricas situadas próximas às suas capitais [3].

Os recursos empregados na expansão do sistema de transmissão são resultantes da parceria público-privada, desde 1999, quando a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) realizou as primeiras licitações para construção de 765 quilômetros de extensão de três novas

linhas de transmissão e dezenas de subestações. Os empreendedores pioneiros que venceram a disputa aplicaram cerca de R\$ 440 milhões nesses empreendimentos.

Desde então, foram outorgadas concessões para 13,7 mil quilômetros de novas linhas e entre elas 7,4 mil quilômetros entraram em operação comercial até junho de 2004 e prevê-se a entrada em operação de mais 800 km. Esses empreendimentos melhorarão significativamente a capacidade de transmissão de energia, pois acrescentarão mais de 20% na extensão das linhas, em relação aos 61,5 mil km existentes em 1995, além de que criarão oportunidade de empregos diretos para mais de 25 mil pessoas.

O Sistema Interligado Nacional permite que as diferentes regiões permutem energia entre si, quando uma delas apresenta queda no nível dos reservatórios. Como o regime de chuvas é diferente nas regiões Sul, Sudeste, Norte e Nordeste, os grandes troncos (linhas de transmissão de mais alta tensão: 500 kV ou 750 kV) possibilitam que os pontos com produção insuficiente de energia sejam abastecidos por centros de geração em situação favorável.

Atualmente, de acordo com dados disponíveis na página do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), no final de 2009 a rede de transmissão brasileira era formada por mais de 89200 km de linhas de transmissão - nas tensões 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV e 750 kV - que formam a Rede Básica [4].

A Figura 1.1 mostra o Sistema de Transmissão Interligado Nacional.

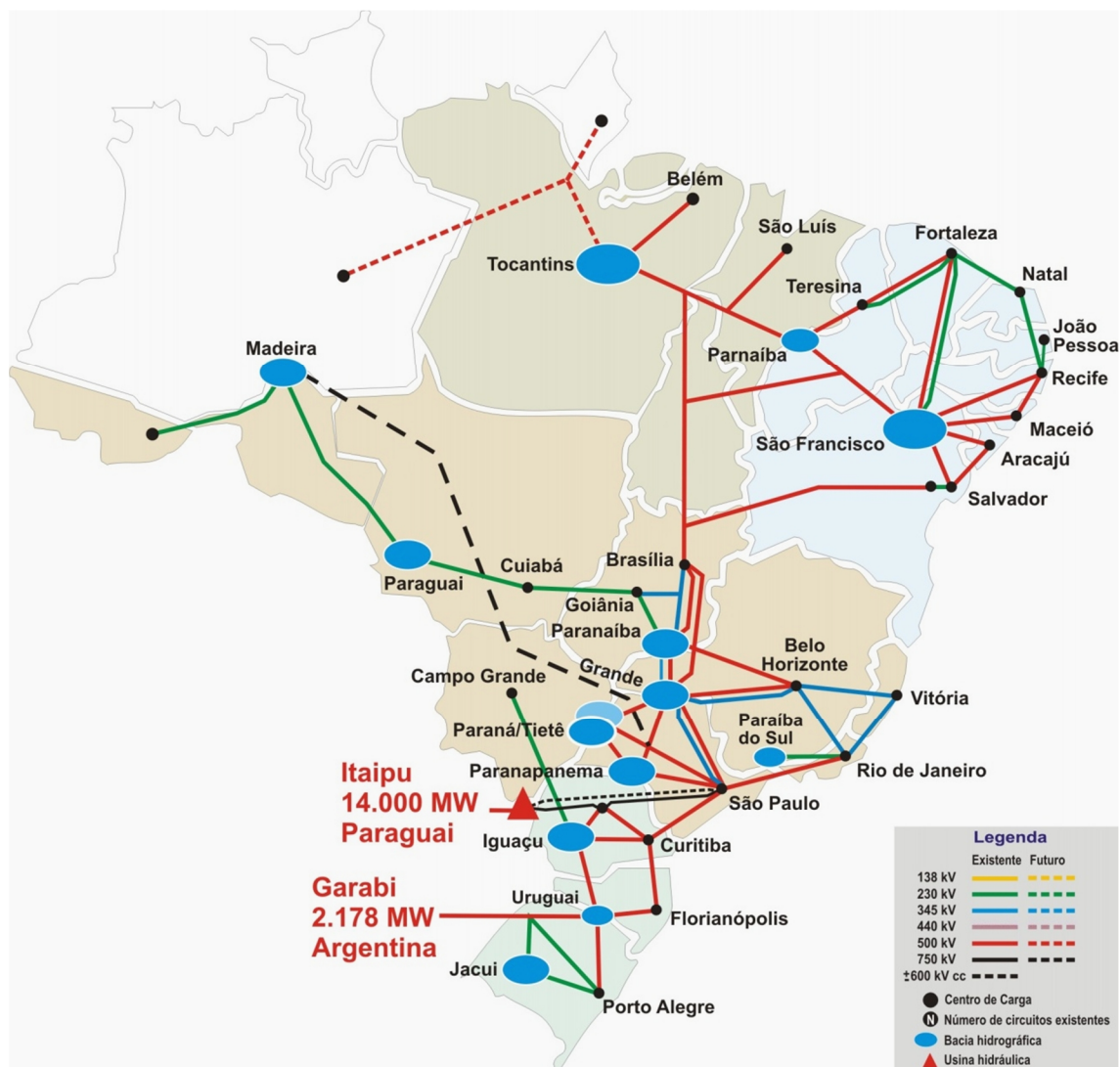


Figura 1.1. Sistema de Transmissão Interligado Nacional.

1.3 Descrição e Especificação das Linhas de Transmissão

Nesse item, são descritas as torres metálicas convencionais utilizadas na configuração das linhas de transmissão encontradas no sistema interligado nacional.

As linhas de transmissão aéreas são compostas por extensos cabos metálicos, sustentados por cerca de 33 mil torres, através de cadeias de isoladores e ferragens que seguem pelas faixas de segurança.

As silhuetas típicas das torres de transmissão (metálicas) da companhia de Transmissão Paulista são apresentadas nas figuras 1.2 a 1.5 [4].

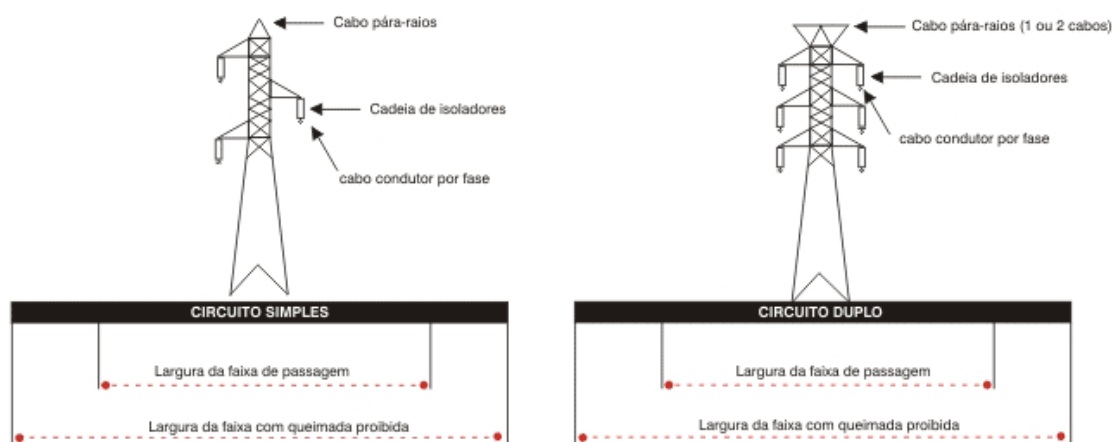


Figura 1.2. Estrutura para circuito simples e circuito duplo.

A figura 1.2 apresenta a estrutura para circuito simples e circuito duplo, onde a largura da faixa de passagem é de 30 metros e a largura da faixa com queimada proibida é de 60 metros. Para linha de 88 kV a cadeia de isoladores é composta por 6 ou 7 discos, para linha de 138 kV a cadeia de isoladores são compostas por 9 ou 10 discos. Para circuito duplo de linhas de 230 kV, a largura da faixa de passagem é de 50 metros, e a largura da faixa com queimada proibida é de 80 metros, tal estrutura possui uma cadeia de isoladores é de 15 ou 16 discos, podendo ter dois cabos condutores por fase.

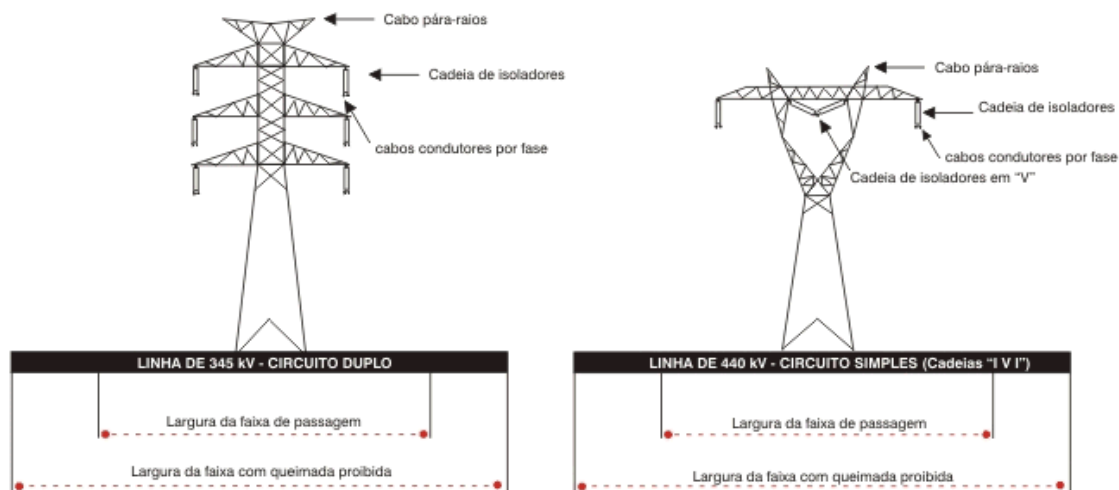


Figura 1.3. Estruturas de circuito duplo e simples.

A figura 1.3 mostra a estrutura para circuito duplo e circuito simples, para a linha de 345 kV e 440 kV respectivamente. Para os dois tipos de estruturas a largura da faixa de passagem é de 50 metros e a largura da faixa com queimada proibida é de 80 metros. A cadeia de isoladores para o circuito simples é de 24 a 30 discos, com quatro condutores por fase, já para o circuito duplo a cadeia de isoladores é de 19 ou 20 discos e possui dois ou quatro cabos condutores por fase.

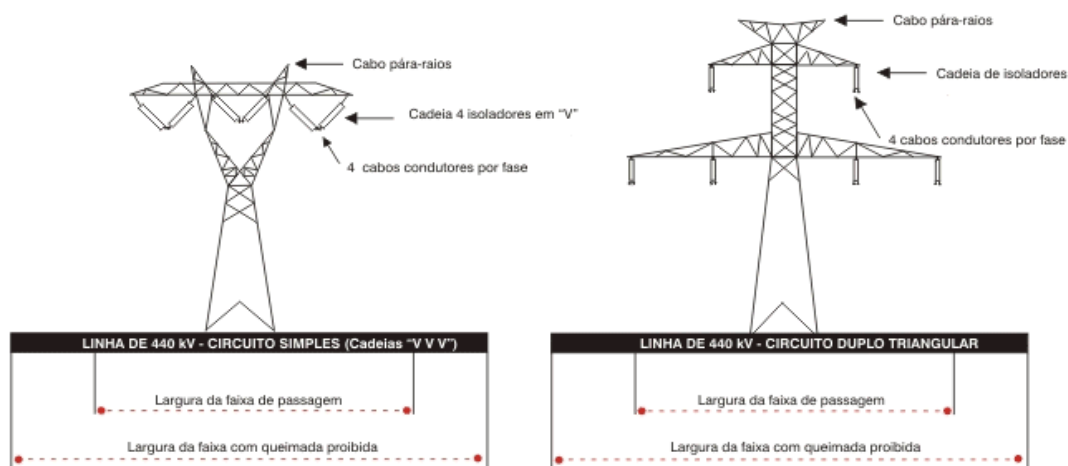


Figura 1.4. Estruturas de circuito simples e circuito duplo triangular.

O circuito simples com linha de 440 kV da figura 1.4 apresenta a largura da faixa de passagem de 40 metros e a largura da faixa com queimada proibida de 70 metros, seus isoladores são em “V” e possuem 24 ou 26 discos em cada isolador. Já o circuito duplo triangular com linha de 440 kV, tem a largura da faixa de passagem de 60 metros e a largura da faixa com queimada proibida de 90 metros, seus isoladores possuem 24 discos.

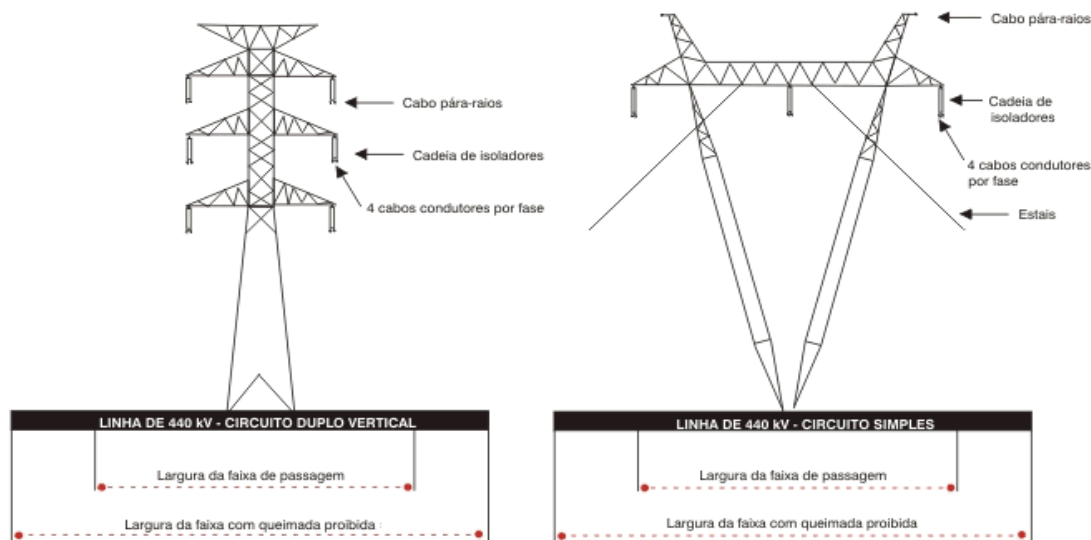


Figura 1.5. Estrutura de circuito duplo vertical e circuito simples.

O circuito duplo vertical e o circuito simples com linha de 440 kV da figura 1.5 apresentam a largura da faixa de passagem de 50 metros e a largura da faixa com queimada proibida de 80 metros, seus isoladores possuem 24 discos e cada fase tem 4 cabos condutores.

1.3.1 Condutores Múltiplos [2]

Nas linhas de transmissão, o uso de fios foi praticamente abandonado em favor dos cabos, obtidos pelo encordoamento de fios elementares. Nesse item são tratados os condutores múltiplos. Usados de modo geral, em linhas com tensões acima de 300 kV. Tendo como função aumentar a capacitância entre fases-torre e fase-fase, diminuindo as perdas por corona e conseqüentemente

aumentando o isolamento e a capacidade de transmissão da linha. A figura 1.6 mostra algumas configurações de condutores múltiplos.

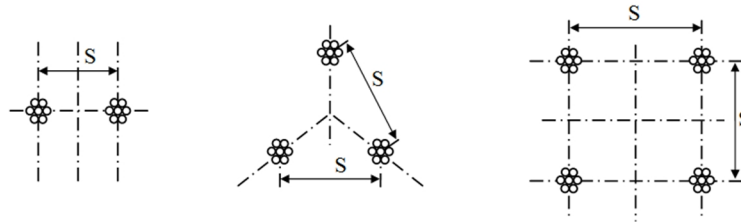


Figura 1.6. Configurações de condutores múltiplos.

O número de subcondutores por condutor múltiplo, os diâmetros dos subcondutores e o espaçamento entre os mesmos têm sido objeto de cuidadosas investigações em todos os centros de pesquisa, uma vez que esses parâmetros têm relação direta com a intensidade dos fenômenos provocados pelo efeito corona. Um número maior de subcondutores por feixe tende a um desempenho melhor do que um número menor de subcondutores, para uma mesma capacidade térmica de transporte; não obstante, há um acréscimo no custo do equipamento e nas despesas de instalação, o que favorece um número menor de subcondutores. O espaçamento entre subcondutores, também um fator importante no desempenho das linhas, é igualmente condicionado por limitações de natureza econômica.

1.3.2 Isoladores [2]

Os cabos são suportados pelas estruturas através dos isoladores, que, como seu próprio nome indica os mantém isolados eletricamente das torres. Devem resistir tanto às solicitações mecânicas como as elétricas.

As solicitações de natureza elétrica a que um isolador deve resistir são as tensões mais elevadas que podem ocorrer nas linhas. Tais como a tensão normal e sobretensões em frequência industrial; surtos de sobretensão de manobra, que são de curta duração e podem atingir níveis de 3 a 5 vezes a tensão nominal e sobretensões de origem atmosférica.

Um isolador deve ainda ser capaz de fazer o máximo uso do poder isolante do ar que o envolve a fim de assegurar isolamento adequado. A falha de um isolador pode ocorrer tanto no interior do material (perfuração) ou pelo ar que o envolve (descarga externa). Seu desenho deve ser de forma a assegurar uma distribuição balanceada de potenciais e, conseqüentemente, dos gradientes no ar, com o objetivo de assegurar tensões de descarga adequadas. Além desses requisitos, deve ainda satisfazer a não produção, mesmo após longos períodos de operação, da radio interferência. Esta, em geral, é causada nos isoladores por minúsculos pontos de disrupção elétrica para o ar. Os eflúvios assim produzidos causam correntes de altas frequências.

Os isoladores podem ser construídos com porcelana vitrificada ou vidro temperado. A figura 1.7 mostra tais dispositivos instalados nas torres.



Figura 1.7. A esquerda tem-se uma cadeia de isoladores de porcelana e a direita isoladores de vidro.

1.3.3 Anéis Anti-Corona [2]

O problema de distribuição não uniforme dos potenciais foi observado logo no começo do uso de cadeias de isoladores, observando-se perfurações do dielétrico nos primeiros elementos da cadeia, como também correntes de escape sobre sua superfície. Procuraram-se então, meios de se evitar esse problema. Primeiramente se sugeriu o emprego de discos com maiores tensões disruptivas junto aos condutores. Posteriormente foram inventados os anéis distribuidores de potencial, também conhecidos como anéis anti-corona.

Esses anéis distribuidores de potencial, mostrados na figura 1.8, têm por finalidade aumentar a capacitância entre as peças metálicas dos isoladores e condutores. Eles não provocam a distribuição uniforme em todos os isoladores da cadeia, porém reduz substancialmente o potencial a que fica submetido o isolador inferior.

Os anéis de potencial, no entanto, reduzem a distância disruptiva da cadeia, principalmente quando associados com outros anéis e chifres na parte superior, reduzindo sua eficiência. Em linhas de tensão extra-elevadas verificam-se grandes concentrações de potenciais nas angulosidades e arestas inevitáveis das ferragens de suspensão, de forma que são adotados anéis distribuidores chamados anéis guarda (*corona shields*), colocados lateralmente aos grampos de suspensão.

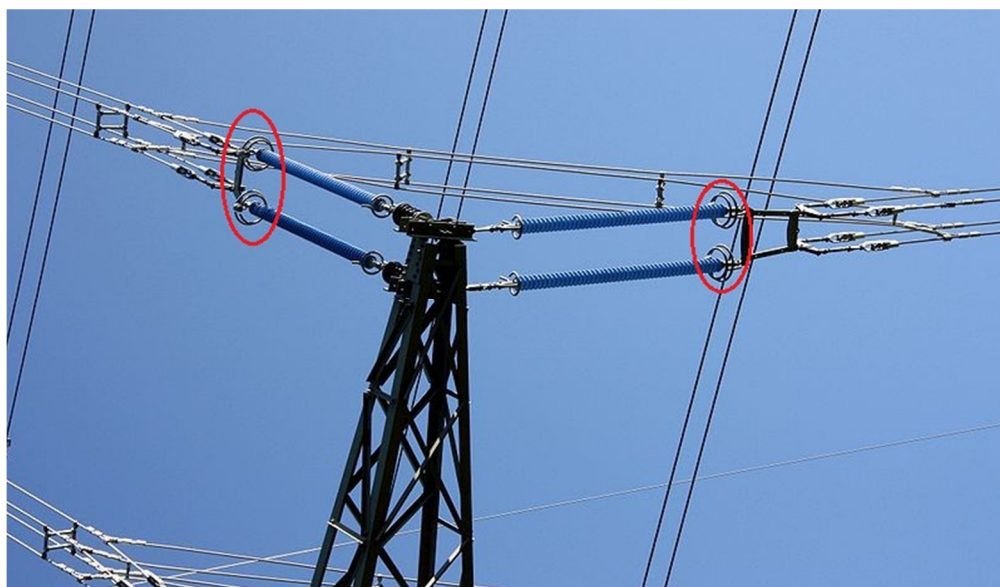


Figura 1.8. Foto descrevendo a utilização de anéis anti-corona (destacados em vermelho) nas cadeias de isoladores.

1.4 Conclusão

No corrente capítulo foram descritos alguns dados da atual configuração do sistema de transmissão nacional. Bem como peculiaridades das linhas interligadas a esse sistema.

Ademais, breves descrições técnicas foram apresentadas sobre os principais componentes de linhas de transmissão convencionais, tais como: condutores múltiplos, isoladores e anéis anti-corona. Tais descrições foram introduzidas com o âmbito de proporcionar uma maior familiaridade com o tema em estudo.

Capítulo 2 Tecnologias de Transmissão de Energia Elétrica

2.1 Introdução

Para transmissão de energia elétrica entre dois pontos, existem numerosas soluções tecnicamente viáveis; porém, apenas um número relativamente pequeno é capaz de assegurar um serviço de padrão ótimo e, ao mesmo tempo, propiciar o transporte de kWh a um custo mínimo sem perder de vista as questões ambientais. O estudo de otimização de uma transmissão visa exatamente identificar essas soluções e, dentre elas, escolher aquela mais adequada ao caso particular. Sob o ponto de vista puramente econômico, a solução mais adequada é aquela em que a soma dos custos das perdas de energia durante a vida útil da linha mais o custo do investimento é mínima. Decorre daí que todas as alternativas possíveis, consideradas aceitáveis sob o ponto de vista técnico, devem ser examinadas e comparadas entre si [12].

Atualmente, existem diversas tecnologias emergentes e em estudo para transmissão. Neste item, são descritas algumas tecnologias no estado atual da arte, tais como as linhas com potência natural elevada (LPNE), linhas compactas e as linhas/trechos com alturas elevadas, sendo esse último o foco do corrente trabalho.

2.2 Linha com Potência Natural Elevada e Compacta

As LPNE ou *High Surge Impedance Loading* - HSIL são linhas de transmissão com a reatância série reduzida devido a configuração adotada no arranjo dos condutores múltiplos das fases e em função da distância reduzida entre elas, o que muitas vezes as tornam classificadas como linhas compactas também. A princípio, essa técnica reduz consideravelmente a reatância série da linha possibilitando um substancial aumento na sua capacidade de transmissão. Ademais, outro atributo dessa tecnologia é a diminuição da faixa de servidão, possibilitando uma menor zona de desflorestamento em diversas ocasiões.

Tal conceito foi elaborado envolvendo diversos estudos quanto ao desempenho; coordenação de isolamento (devido à reduzida distância entre as fases); diversas análises eletromagnéticas envolvendo o ambiente ao redor e transitórios; busca de uma configuração ótima dos subcondutores que compõem os condutores múltiplos das fases; segurança e manutenção.

Um exemplo atualmente utilizado na transmissão de energia é a LPNE desenvolvida pelo CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica) em parceria com a ELETROBRÁS, CHESF e FURNAS. Tal tecnologia permite aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica através de uma disposição assimétrica do condutor múltiplo das fases, de modo a aperfeiçoar a distribuição do campo elétrico entre os subcondutores dos feixes. Com isso, para uma mesma potência a ser transmitida, garante um projeto mais econômico que as propostas tradicionais de linhas de transmissão. Podendo, essa tecnologia, ser utilizada tanto para novos projetos quanto para recapacitação de linhas em operação [6].

Como descrito as LPNE empregam arranjos assimétricos para os subcondutores das fases ao invés da distribuição simétrica em círculo, diferentemente dos condutores múltiplos de linhas convencionais. Tal tecnologia oferece significativa redução da reatância série e aumenta a potência natural (*Surge Impedance Loading* - SIL) da linha de transmissão, por meio da otimização do campo elétrico entre os subcondutores de cada fase. O arranjo do condutor múltiplo e espaçador são observados na figura 2.1.

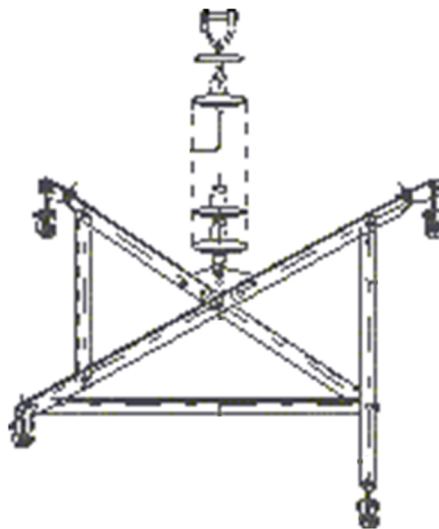


Figura 2.1. Disposição assimétrica dos subcondutores.

Atualmente, a linha entre Banabuiú e Fortaleza, com 180 km, 230 kV e circuito duplo, encontra-se em operação, denominada LPNE FEX (Feixe Expandido). Essa linha pertence a CHESF e resultou no aumento de 1% no custo com um acréscimo de 25% na capacidade de transmissão; postergação de investimentos (LTs e SEs de 500 kV) de US\$ 10 milhões; redução das perdas no trecho Banabuiú-Fortaleza, equivalente a US\$ 300.000 por ano; economia de US\$ 30 milhões, cerca de 11% do empreendimento, considerando-se apenas a redução do peso estrutural [6].

Na figura 2.2 é descrita uma LPNE de circuito simples e feixes assimétricos.



Figura 2.2. Linha de transmissão com potencial naturalmente elevado (condutores múltiplos assimétricos).

Até o presente momento foi discutido sobre os arranjos dos condutores, porém há também de se lembrar das estruturas que sustentam os cabos. Podendo-se citar aqui o esforço empregado para o aperfeiçoamento das linhas de transmissão convencionais, sendo quase que exclusivamente, torres fabricadas em aço treliçadas e cadeias de isoladores de porcelana ou de vidro. As características físicas dessas linhas sempre trouxeram grandes dificuldades para sua implantação em lugares mais densamente povoados, atingindo um grau máximo de impedimento em relação a centros urbanos de cidades de médio e grande porte.

No início da década de 70, com o surgimento em escala comercial dos isoladores compostos, passou-se a explorar uma nova configuração de montagem para linhas de transmissão. Com o isolador composto correspondendo a 10% do peso de uma cadeia de isoladores convencionais de mesmo nível de tensão, pode ser conectado diretamente a uma estrutura tubular de maneira relativamente simples, eliminando-se as mísulas de sustentação utilizadas nas estruturas convencionais. Com esse tipo de montagem, a linha de transmissão necessita de uma faixa de servidão de aproximadamente 30% da faixa padrão requerida por uma linha com configuração convencional. A linha de transmissão montada desta forma passou a ser designada como linha de transmissão compacta [15].

Atualmente são desenvolvidos intensos esforços na busca de novas configurações para diversos níveis de tensão, visando sempre, a redução da faixa de servidão, uma melhor interação ao meio ambiente e uma maior capacidade de transmissão de potência.

A figura 2.3 ilustra um dos vários modelos de linhas compactas - torre cabeça de gato - tendo a concepção em suportes auto-portantes, com parte estrutural entre as fases, levando a uma limitação de sua compactação. Para se obter um SIL maior utilizaram-se feixes regulares expandidos, na forma de um quadrado de lado de 1,2 metros. As fases são dispostas em arranjo triangular, o que propicia uma distribuição de campos elétricos mais equalizada nos subcondutores [16].



Figura 2.3. Torre cabeça de gato.

2.3 Linha de Transmissão com Torre de 350 metros

Outro exemplo a ser destacado é a aplicação de uma torre de aço que foi posta em operação em linhas de transmissão. Possui 350 metros, aproximadamente 50 metros mais alta que a Torre Eiffel, e cinco vezes superior a altura de uma torre convencional usada para uma linha de transmissão de 440 kV. Esta tecnologia foi inicialmente desenvolvida para o sistema de transmissão chinês, com o projeto da linha sobre o rio *Yangtze* ao longo da província de *Jiangsu*, com torres de 346 metros e espaçadas 2,3 km uma da outra. As torres foram construídas por uma parceria entre *Cleveland Bridge e Balfour Beatty Power Networks*. Fazem parte projeto de transmissão de energia da China oriental, e são necessárias para a distribuição de 500 kV de eletricidade a partir da subestação de *Yan Cheng*, em *Shanxi*, no norte para a subestação de *Shan Dou* na província de *Jiangsu*, no sul da China. Cada uma das enormes estruturas contém 4300 toneladas de aço unidas por mais de 200 toneladas de parafusos, e elas foram concebidas com uma oscilação máxima de até dois metros em seu ponto mais elevado [13]. Ademais, as torres são equipadas com elevadores que levam até 330 metros de altura, no interior da estrutura metálica. A figura 2.4 apresenta a dimensão da estrutura da torre frente às construções que a rodeiam.



Figura 2.4. Imagem da torre de transmissão de energia construída na China.

A figura 2.5 mostra a visão interna da estrutura metálica da torre supracitada a partir de sua base, destacando a presença do elevador e da escada circular, no centro da estrutura.



Figura 2.5. Visão interna da estrutura metálica da torre.

Atualmente está sendo proposta para o sistema brasileiro uma linha de transmissão com estrutura semelhante entre Tucuruí e Manaus, através do território da Amazônia. A ligação projetada tem 1811 km sendo sustentada por dezenas de torres de aço com aproximadamente 300 metros cada uma. Vale lembrar que as estruturas convencionais têm entre 20 e 50 metros.

O objetivo desse projeto é a interligação do estado do Amazonas com o sistema interligado brasileiro. Uma vez que, quase toda a região Norte é abastecida por térmicas movidas a óleo diesel, o que encarece o custo da energia e gera poluição pela queima de combustíveis fósseis. Com a entrada em operação da linha Tucuruí-Macapá-Manaus, em 2011, a expectativa é de que sejam beneficiados 2,2 milhões de pessoas.

A integração da região Norte faz parte do Programa de Expansão de Transmissão (PET) que anualmente é revisado pela EPE. Para o período 2008-2012, a previsão é de licitar 3000 km de novas linhas, com investimentos estimados em 7,9 bilhões de reais, já incluída a linha Tucuruí/Manaus [14].

2.4 Conclusão

Nesse capítulo foram apresentadas algumas das tecnologias de transmissão de energia elétrica através de linhas aéreas. Visando o aumento da capacidade de carregamento, viabilidade econômica e aspectos ambientais.

Todos os métodos propostos visam à otimização da transmissão. Melhorando aspectos como: a redução da reatância série e aumento da potência natural da linha de transmissão, a redução da faixa de servidão, um menor impacto ambiental e uma maior capacidade de transmissão.

Por fim, a criação de um novo modelo de torre metálica com altura próxima a 300 metros. Que pode varrer grandes vãos diminuindo ainda mais a faixa de servidão, que fica confinada a apenas a base das torres. Vem para complementar os esforços para uma maior eficiência no transporte de energia.

Capítulo 3 Cálculo dos Parâmetros Elétricos de Linhas Aéreas de Transmissão

3.1 Introdução

No estudo do desempenho das linhas de transmissão, bem como no desenvolvimento de novas técnicas para aperfeiçoamento no potencial de transmissão, verifica-se que o transporte de energia elétrica é decisivamente influenciado pelos valores de seus parâmetros elétricos e pela geometria e composição dos cabos.

O cálculo dos parâmetros é necessário para obtenção de dados confiáveis no projeto de linhas de transmissão [2].

São quatro os parâmetros principais no projeto de linhas em geral: resistência e indutância longitudinais, capacitância e condutância transversais.

Nesse capítulo, é descrito detalhadamente de que forma são calculados os parâmetros próprios e mútuos de uma linha de transmissão polifásica, considerando a natureza distribuída dos mesmos.

Dados técnicos e equacionamento em geral são obtidos a partir das bibliografias descritas em [2] e [7].

3.2 Impedâncias Longitudinais da Linha

As impedâncias, próprias e mútuas, inseridas nas equações de uma linha, representada no domínio da frequência, podem ser obtidas a partir da solução das equações de Maxwell levando em consideração as condições de contorno de três materiais que são o condutor propriamente dito, o ar e o solo [8]. Considerando-se que esses três materiais podem ser caracterizados por uma resistência, por uma permeabilidade magnética e por uma permissividade dielétrica, pode-se

mostrar que as impedâncias da linha podem ser descritas em função das propriedades físicas do sistema (ar, solo e condutor) e da frequência.

Para fins de cálculo, a impedância longitudinal de uma linha de transmissão é dividida em três componentes: impedância externa (Z_{ext}); impedância interna (Z_{int}) e impedância devido ao retorno da corrente através do solo (Z_{solo}). Sendo a impedância total da linha corresponde à soma destas três componentes.

3.2.1 Impedância Externa

A impedância externa é resultante da ação do campo magnético no ar, considerando que o condutor e a linha são ideais.

De acordo com a figura 3.1, são descritos os condutores i e k de uma linha de transmissão bifásica genérica, sobre um solo ideal [8].

O raio dos condutores i e k são descritos genericamente como sendo r_i e r_k , respectivamente. Os condutores fictícios i' e k' são imagens dos condutores i e k , respectivamente. A permeabilidade magnética do ar μ_0 é $4\pi \times 10^{-4}$ [H km⁻¹].

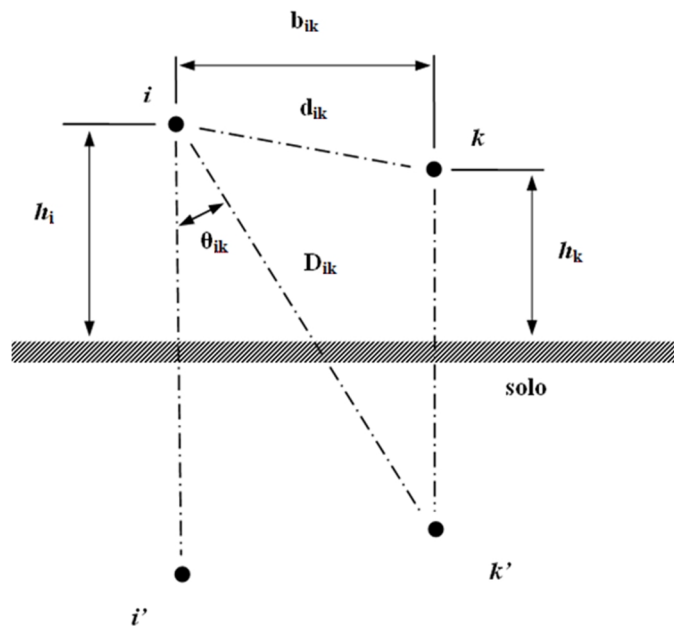


Figura 3.1. Condutores i e k e suas respectivas imagens i' e k' .

As impedâncias externas mútuas e próprias, relativas aos condutores i e k, são dadas por:

$$Z_{ext_{ik}}(\omega) = Z_{ext_{ki}}(\omega) = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}}\right) \quad (3.1)$$

$$Z_{ext_{ii}}(\omega) = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad (3.2)$$

$$Z_{ext_{kk}}(\omega) = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_k}{r_k}\right) \quad (3.3)$$

Sendo $Z_{ext_{ik}}$ e $Z_{ext_{ki}}$ impedâncias externas mútuas entre os dois condutores, $Z_{ext_{ii}}$ é a impedância externa própria relativa ao condutor i e $Z_{ext_{kk}}$ a impedância externa própria relativa ao condutor k, dadas em $[\Omega \text{ km}^{-1}]$.

Vale ressaltar que ω representa a velocidade angular relacionada a frequência f dada pela equação (3.4):

$$\omega = 2\pi f \quad (3.4)$$

A impedância externa, como observado nas equações anteriores, representa uma reatância indutiva. Logo, a impedância externa pode ser descrita como:

$$Z_{ext}(\omega) = j\omega L_{ext} \quad (3.5)$$

Pode-se definir as indutâncias externas pelas seguintes expressões:

$$\text{Lext}_{ik} = \text{Lext}_{ki} = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}} \right) \quad (3.6)$$

$$\text{Lext}_{ii} = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left(\frac{2h_i}{r_i} \right) \quad (3.7)$$

$$\text{Lext}_{kk} = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left(\frac{2h_k}{r_k} \right) \quad (3.8)$$

Sendo Lext_{ik} e Lext_{ki} as indutâncias externas mútuas entre os dois condutores e Lext_{ii} e Lext_{kk} as indutâncias externas próprias relativas aos condutores i e k , respectivamente. Geralmente, as indutâncias externas longitudinais são dadas em $[\text{mH km}^{-1}]$.

Observando as equações descritas nessa seção, é possível afirmar que essas são dependentes exclusivamente da geometria da linha, das características físicas dos condutores e do meio em que a linha se encontra.

Desse modo, para uma linha genérica com nf fases, considerando que cada fase é constituída de um único condutor, pode-se escrever a matriz de impedâncias externas como:

$$[\mathbf{Z}_{\text{ext}}] = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_1}{r_1} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \dots & \ln \frac{D_{1nf}}{d_{1nf}} \\ \ln \frac{D_{21}}{d_{21}} & \ln \frac{2h_2}{r_2} & \dots & \ln \frac{D_{2nf}}{d_{2nf}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{nf1}}{d_{nf1}} & \ln \frac{D_{nf2}}{d_{nf2}} & \dots & \ln \frac{2h_{nf}}{r_{nf}} \end{bmatrix}$$

$$\therefore [\mathbf{Z}_{ext}] = \begin{bmatrix} Z_{ext_{11}} & Z_{ext_{12}} & \cdots & Z_{ext_{1nf}} \\ Z_{ext_{21}} & Z_{ext_{22}} & \cdots & Z_{ext_{2nf}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{ext_{nf1}} & Z_{ext_{nf2}} & \cdots & Z_{ext_{nf\ nf}} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Logo, a equação (3.9) pode ser escrita em sua forma compacta:

$$[\mathbf{Z}_{ext}] = j\omega[\mathbf{L}_{ext}] \quad (3.10)$$

A matriz de indutâncias externas próprias e mútuas, para m fases, pode ser descrita de forma genérica por:

$$[\mathbf{L}_{ext}] = \frac{\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_1}{r_1} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \cdots & \ln \frac{D_{1nf}}{d_{1nf}} \\ \ln \frac{D_{21}}{d_{21}} & \ln \frac{2h_2}{r_2} & \cdots & \ln \frac{D_{2nf}}{d_{2nf}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{nf1}}{d_{nf1}} & \ln \frac{D_{nf2}}{d_{nf2}} & \cdots & \ln \frac{2h_{nf}}{r_{nf}} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Observa-se que a matriz $[\mathbf{L}_{ext}]$ está em função da geometria dos condutores e das características físicas do meio, sendo independente da variação da frequência.

3.2.2 Impedância Interna Devido ao Efeito Pelicular (Skin Effect)

A distribuição uniforme da corrente através da secção transversal de um condutor é observada quando se trata de um sistema em corrente contínua. Em corrente alternada, com o aumento da frequência, ocorre a não uniformidade, intensificando a diferença entre as densidades de corrente nas diferentes regiões da secção transversal. Esse fenômeno é denominado efeito

pelicular ou *skin effect* [7]. Em um condutor com secção transversal circular, a densidade do fluxo de cargas aumenta progressivamente do interior para a superfície externa do condutor, proporcionalmente ao aumento da frequência. Para condutores de raio suficientemente grande, pode-se ter uma densidade de corrente oscilante ao longo do raio.

A figura 3.2, obtida a partir de [7], descreve de forma ilustrativa o efeito pelicular sobre um condutor, baseando-se nas descrições geométricas desse e na densidade de corrente através da secção transversal.

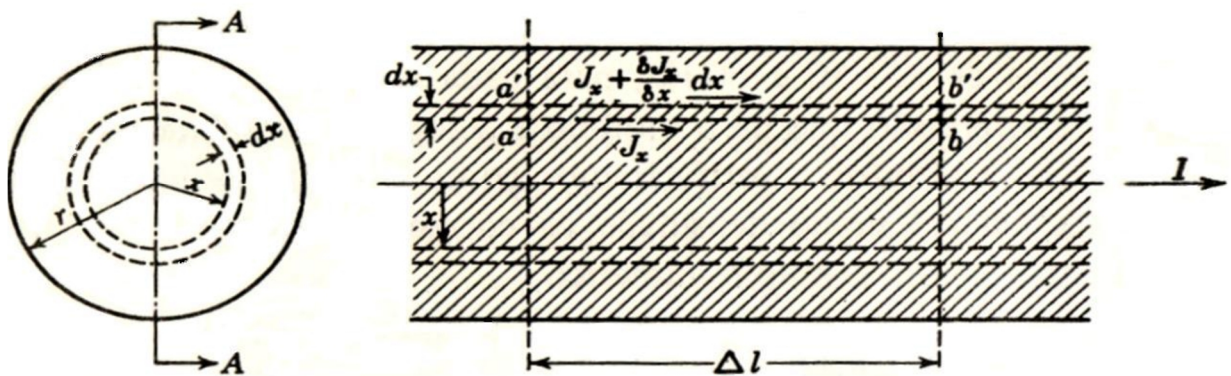


Figura 3.2. Secção transversal e longitudinal de um condutor cilíndrico [7].

Considerando diferentes filamentos longitudinais normais à secção transversal do condutor na figura 3.2, aqueles situados na superfície não são concatenados pelo fluxo interno. O fluxo concatenado com um filamento próximo à superfície será menor que o fluxo concatenado a um filamento mais interno. A não uniformidade do fluxo concatenado é a causa do efeito pelicular. Em altas frequências e para condutores com raios maiores, o efeito pelicular altera completamente tanto a resistência como a reatância. Mesmo nas frequências usuais em sistemas de potência, esse efeito é bastante acentuado em condutores com maior secção transversal.

A densidade de corrente e, posteriormente, a parcela da impedância decorrente do efeito pelicular no condutor, pode ser obtida de duas formas: de modo exato derivado das Equações de Maxwell ou a partir de uma forma especial da equação de Bessel [17].

O presente trabalho segue pela formulação e resolução a partir das equações de Bessel, como mostrado na equação 3.12 abaixo.

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dy}{dx} + k^2 y = 0 \quad (3.12)$$

Sendo a equação de Bessel com soluções de n -ésima ordem:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dy}{dx} + \left(k^2 - \frac{n^2}{x^2} \right) y = 0 \quad (3.13)$$

As soluções da equação (3.12) são chamadas de funções de Bessel de ordem zero, sendo o valor de $n = 0$. A equação de Bessel aplicada à densidade de corrente é:

$$\frac{d^2 J_x}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dJ_x}{dx} - \frac{j\omega\mu}{\rho} J_x = 0 \quad (3.14)$$

Na equação (3.14), J_x é o fasor que representa a densidade de corrente em função da distância radial ao centro do condutor, sendo essa uma função complexa. Portanto, a distância radial x deve ser considerada como componente real de uma variável complexa. Tem-se ρ como a resistividade do condutor e μ a permeabilidade magnética do condutor.

Para solucionar a equação (3.12), é necessário representá-la como uma série infinita:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n \quad (3.15)$$

Logo, pode-se determinar que:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = 2a_2 + 6a_3 x + 12a_4 x^2 + 20a_5 x^3 + 30a_6 x^4 + \dots \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{x} \frac{dy}{dx} = \frac{a_1}{x} + 2a_2 + 3a_3x + 4a_4x^2 + 5a_5x^3 + 6a_6x^4 + \dots \quad (3.17)$$

$$k^2 y = k^2 a_0 + k^2 a_1 x + k^2 a_2 x^2 + k^2 a_3 x^3 + k^2 a_4 x^4 + \dots \quad (3.18)$$

Para satisfazer a equação (3.12), a soma dos coeficientes de cada potência de x , quando as equações (3.16) e (3.18) são somadas, deve ser igual a zero. Portanto:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0 \\ 2a_2 + 2a_2 + k^2 a_0 &= 0 \\ 6a_3 + 3a_3 + k^2 a_1 &= 0 \\ 12a_4 + 4a_4 + k^2 a_2 &= 0 \\ 20a_5 + 5a_5 + k^2 a_3 &= 0 \\ 30a_6 + 6a_6 + k^2 a_4 &= 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Todos os coeficientes ímpares são nulos, uma vez que dependem de a_1 . Já os coeficientes pares dependem de a_0 , portanto:

$$\begin{aligned} a_2 &= -\frac{k^2 a_0}{2^2} \\ a_4 &= \frac{k^4 a_0}{2^2 4^2} \\ a_6 &= -\frac{k^6 a_0}{2^2 4^2 6^2} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Substituindo esses coeficientes em (3.15), obtém-se a seguinte série:

$$y = a_0 \left[1 - \frac{(kx)^2}{2^2} + \frac{(kx)^4}{2^2 4^2} - \frac{(kx)^6}{2^2 4^2 6^2} + \dots \right] \quad (3.21)$$

Essa série, conhecida como função de Bessel de primeira classe, de ordem zero e representada por $J_0(kx)$, onde J_0 não deve ser confundido com o símbolo utilizado para densidade de corrente.

A equação (3.14) pode ser solucionada de maneira análoga, supondo que o complexo J_x seja igual a uma série infinita de potências de x . Substituindo

$$\frac{-j\omega\mu}{\rho} = k^2 \quad (3.22)$$

e

$$J_x = y \quad (3.23)$$

em (3.21), obtém-se a mesma solução relativa à equação (3.14), substituindo J_x por uma série de potências crescentes de x . A densidade de corrente a uma distância x do centro do condutor é descrita como:

$$J_x = a_0 \left[1 + \frac{j\omega}{\rho} \mu \frac{x^2}{2^2} - \left(\frac{\omega\mu}{\rho} \right)^2 \frac{x^4}{2^2 4^2} - j \left(\frac{\omega\mu}{\rho} \right)^3 \frac{x^6}{2^2 4^2 6^2} + \dots \right] \quad (3.24)$$

Separando a série (3.24) em uma série real e a outra imaginária, cada uma delas será uma forma modificada da função de Bessel. Separando os termos reais e imaginários e substituindo

$$m = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\rho}} \quad (3.25)$$

obtém-se as seguintes expressões:

$$J_x = a_0 \left[1 - \frac{(mx)^4}{2^2 4^2} + \frac{(mx)^8}{2^2 4^2 6^2 8^2} - \dots \right] + ja_0 \left[\frac{(mx)^2}{2^2} - \frac{(mx)^6}{2^2 4^2 6^2} + \frac{(mx)^{10}}{2^2 4^2 6^2 8^2 10^2} - \dots \right] \quad (3.26)$$

$$J_x = a_0 (bermx + jbeimx) \quad (3.27)$$

sendo:

$$bermx = 1 - \frac{(mx)^4}{2^4 (2!)^2} + \frac{(mx)^8}{2^8 (4!)^2} - \dots \quad (3.28)$$

$$beimx = \frac{(mx)^2}{2^2} - \frac{(mx)^6}{2^6 (3!)^2} + \frac{(mx)^{10}}{2^{10} (5!)^2} - \dots \quad (3.29)$$

Os termos *ber* e *bei* são abreviações de Bessel real e Bessel imaginária respectivamente. Vale observar que, de acordo com a literatura técnica, existem tabelas com os valores de *ber* e *bei* para diferentes argumentos [9], [10].

O coeficiente a_0 poderá ser determinado se a densidade de corrente fasorial J_r , na superfície do condutor for conhecida, verificando que:

$$J_r = a_0 (bermr + jbeimr) \quad (3.30)$$

Isolando a_0 na equação (3.30) e substituindo em (3.27) obtém-se:

$$J_x = J_r \frac{bermx + jbeimx}{bermr + jbeimr} \quad (3.31)$$

A equação (3.31) é a função da densidade de corrente em qualquer ponto do condutor em função da densidade de corrente na superfície.

Para determinar a impedância interna de um condutor quando a corrente não se distribui uniformemente por sua secção transversal, é importante conhecer a densidade de corrente, equacionada em (3.31), em um condutor cilíndrico. Entende-se por impedância interna aquela devida apenas à resistência do condutor e ao fluxo concatenado interno.

A corrente I está relacionada com a intensidade de campo magnético na superfície do condutor, equacionada por:

$$I = 2 \pi r H_r \quad (3.32)$$

De acordo com [7], a partir do equacionamento do campo magnético H_x a uma distância x do centro de um condutor cilíndrico de raio r , obtém-se a seguinte função:

$$H_r = -j \frac{1}{m^2} \left(\frac{dJ_x}{dx} \right)_{x=r} \quad (3.33)$$

e substituindo na equação (3.33) a equação (3.31), obtém-se:

$$H_r = -j \frac{1}{m^2} \frac{J_r}{bermr + jbeimr} \left[\frac{d}{dx} (bermx + jbeimx) \right]_{x=r} \quad (3.34)$$

Simplificando a notação:

$$ber' mx = \frac{d}{d(mx)} (bermx) = \frac{1}{m} \frac{d}{dx} (bermx) \quad (3.35)$$

$$bei' mx = \frac{d}{d(mx)} (beimx) = \frac{1}{m} \frac{d}{dx} (beimx) \quad (3.36)$$

A partir de (3.32) e (3.33), com as notações simplificadas em (3.35) e (3.36), a corrente pode ser obtida e descrita por:

$$I = \frac{2 \pi r J_r}{m} \frac{bei' mr - jber' mr}{bermr + jbeimr} \quad (3.37)$$

Dividindo (3.37) por m , considerando x igual a r e posteriormente substituindo em (3.38), logo abaixo, obtém-se a impedância interna descrita por (3.39):

$$Z_{\text{int}} = \left(\frac{\rho J_x}{I} \right)_{x=r} \quad (3.38)$$

$$\therefore Z_{\text{int}} = \frac{\rho m}{2\pi r} \frac{bermr + jbeimr}{bei'mr - jber'mr} \quad (3.39)$$

Logo, a impedância interna de um condutor pode ser determinada para qualquer frequência desde que sejam conhecidos o raio, a resistividade e a permeabilidade. Para ser consistente com o Sistema Internacional de medidas (S.I.), a resistividade é dada em $[\Omega \text{ m}^{-1}]$ [7].

A impedância interna de um condutor é constituída pela resistência e pela reatância indutiva. A parcela real da impedância complexa é a resistência efetiva. A resistência efetiva de um condutor pode ser determinada por meio da racionalização da expressão (3.39) e separando as partes reais e imaginárias. Assim, pode-se determinar:

$$R_{\text{int}} = \frac{\rho m}{2\pi r} \frac{bermr \, bei'mr - beimr \, ber'mr}{(bei'mr)^2 + (ber'mr)^2} \quad (3.40)$$

$$\omega L_{\text{int}} = \frac{\rho m}{2\pi r} \frac{beimr \, bei'mr + bermr \, ber'mr}{(bei'mr)^2 + (ber'mr)^2} \quad (3.41)$$

Sendo L_{int} a indutância interna dada em $[\text{Hm}^{-1}]$.

Portanto, para uma linha genérica polifásica, com nf fases constituídas por um único condutor, pode-se descrever as seguintes matrizes para as resistências e indutâncias:

$$[\mathbf{Rint}(\omega)] = \begin{bmatrix} \text{Rint}_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \text{Rint}_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \text{Rint}_{nf\ nf} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$[\mathbf{Lint}(\omega)] = \begin{bmatrix} \text{Lint}_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \text{Lint}_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \text{Lint}_{nf\ nf} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Logo, a matriz de impedâncias internas $[\mathbf{Zint}(\omega)]$ genérica, é dada por:

$$[\mathbf{Zint}(\omega)] = \begin{bmatrix} \text{Zint}_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \text{Zint}_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \text{Zint}_{nf\ nf} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Sendo a equação matricial de $[\mathbf{Zint}(\omega)]$ dada em $[\Omega\ \text{m}^{-1}]$ e descrita de forma complexa por:

$$[\mathbf{Zint}(\omega)] = [\mathbf{Rint}(\omega)] + j\omega[\mathbf{Lint}(\omega)] \quad (3.45)$$

Ressaltando que as matrizes relativas à impedância interna são todas matrizes diagonais, pois não possuem componentes mútuas, e variam em função da frequência devido ao efeito pelicular, como descrito anteriormente.

3.2.3 Impedância Devido ao Efeito do Solo

Devido ao fato do solo não ser um condutor ideal e a interação entre o campo magnético da fase e solo, é possível observar uma impedância que assume características mais acentuadas em altas frequências. Esse fenômeno é denominado efeito solo.

Por meio dos termos de correção de Carson é possível determinar a resistência e reatância indutiva do solo, denominadas pela literatura como sendo fatores de correção da impedância total: $\Delta R'$ e $\Delta X'$, respectivamente. Esses dois termos são funções das características geométricas e físicas da linha, que podem ser observadas na figura 3.1.

A partir de uma integral infinita, Carson determina as resistências e reatâncias indutivas mútuas e próprias desenvolvendo uma somatória baseada em séries trigonométricas infinitas.

Carson considerou condutores paralelos ao solo, admitindo a resistividade como uniforme e tendo extensão infinita. Demonstrou que as impedâncias próprias e mútuas de circuitos com retorno pelo solo são iguais às impedâncias para um circuito envolvendo um solo ideal, no qual se considera um condutor imagem a mesma profundidade que a altura do condutor acima do solo, acrescida de um fator de correção aplicável a ambas as impedâncias.

O termo de correção foi então associado à impedância devido ao efeito solo. Desse modo, para os condutores i e k , mostrados na figura 3.1, a parcela das impedâncias próprias e mútuas relativas ao efeito solo desses condutores podem ser calculadas, da forma descrita em [2], [7], [11].

A impedância solo pode ser representada em função dos termos de correção $\Delta R'$ e $\Delta X'$, de forma simplificada como sendo:

$$Z_{\text{solo}} = \Delta R' + j\Delta X' \quad (3.46)$$

Os termos de correção de Carson são funções do ângulo θ , indicado na figura 3.1, e do parâmetro δ .

Considerando as impedâncias solo próprias e mútuas relativas aos condutores i e k . O ângulo θ pode ser zero, no caso da impedância própria, ou igual ao ângulo θ_{ik} entre as imagens i' e k' , para o cálculo dos parâmetros mútuos. O parâmetro δ é dado por:

$$\delta = \begin{cases} \delta_{ii} = 4\pi\sqrt{5}.10^{-4} \sqrt{\frac{\omega}{\pi\rho_s}} h_i \\ \delta_{ik} = 4\pi\sqrt{5}.10^{-4} \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\rho_s}} D_{ik} \end{cases} \quad (3.47)$$

Observando que δ_{ii} é relativo à impedância própria e δ_{ik} à impedância mútua. A distância D_{ik} , indicada na figura 3.1, representa a distância entre o condutor i e a imagem k' , a constante h_i representa a altura do condutor i em relação ao solo e ρ_s é a resistividade do solo em $[\Omega \text{ m}]$.

Os termos $\Delta R'$ e $\Delta X'$ são iguais a zero quando $\delta \rightarrow \infty$, considerando a resistividade do solo muito pequena. Carson apresentou uma integral infinita para o cálculo desses termos, desenvolvida como uma série infinita de termos trigonométricos. Logo, considerando $\delta \leq 5$, os termos de correção de Carson são dados como:

$$\Delta R' = 4\omega 10^{-4} \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 \delta \cos \theta + b_2 [(c_2 - \ln \delta) \delta^2 \cos 2\theta + \theta \delta^2 \sin 2\theta] + b_3 \delta^3 \cos 3\theta - d_4 \delta^4 \cos 4\theta + \right. \\ \left. - b_5 \delta^5 \cos 5\theta + b_6 [(c_6 - \ln \delta) \delta^6 \cos 6\theta + \theta \delta^6 \sin 6\theta] + b_7 \delta^7 \cos 7\theta - d_8 \delta^8 \cos 8\theta - \dots \right\} \quad (3.48)$$

$$\Delta X' = 4\omega 10^{-4} \left\{ \frac{1}{2} (0,6159315 - \ln \delta) + b_1 \delta \cos \theta - d_2 \delta^2 \cos 2\theta + b_3 \delta^3 \cos 3\theta + \right. \\ \left. - b_4 [(c_4 - \ln \delta) \delta^4 \cos 4\theta + \theta \delta^4 \sin 4\theta] + b_5 \delta^5 \cos 5\theta - d_6 \delta^6 \cos 6\theta + b_7 \delta^7 \cos 7\theta \right. \\ \left. - b_8 [(c_8 - \ln \delta) \delta^8 \cos 8\theta + \theta \delta^8 \sin 8\theta] + \dots \right\} \quad (3.49)$$

Os termos descritos em (3.48) e (3.49) são dados em $[\Omega \text{ km}^{-1}]$.

Os coeficientes b , c e d são constantes e podem ser obtidos a partir das fórmulas recursivas:

$$b_N = |b_{N-2}| \frac{\sigma}{N(N+2)} \quad (3.50)$$

sendo $b_1 = \sqrt{2}/6$ e $b_2 = 1/16$.

$$\sigma = \begin{cases} +1 & \text{para } N=1, 2, 3, 4, \dots 9, 10, 11, 12, \dots \\ -1 & \text{para } N=5, 6, 7, 8, \dots 13, 14, 15, 16, \dots \end{cases} \quad (3.51)$$

Para sistemas de potência considerando-se baixas frequências, apenas alguns termos das séries infinitas de $\Delta R'$ e $\Delta X'$ são necessários para se obter um resultado satisfatório. Para sistemas com altas frequências são necessários mais termos e, conforme a frequência aumenta maior a quantidade de termos requeridos.

Portanto, a partir do equacionamento descrito neste subitem, é possível apresentar a forma matricial de $\Delta R'$, $\Delta X'$ e de Z_{solo} :

$$[\Delta R'(\omega)] = \begin{bmatrix} \Delta R'_{11} & \Delta R'_{12} & \cdots & \Delta R'_{1nf} \\ \Delta R'_{21} & \Delta R'_{22} & \cdots & \Delta R'_{2nf} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta R'_{nf1} & \Delta R'_{nf2} & \cdots & \Delta R'_{nf\ nf} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$[\Delta X'(\omega)] = \begin{bmatrix} \Delta X'_{11} & \Delta X'_{12} & \cdots & \Delta X'_{1nf} \\ \Delta X'_{21} & \Delta X'_{22} & \cdots & \Delta X'_{2nf} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta X'_{nf1} & \Delta X'_{nf2} & \cdots & \Delta X'_{nf\ nf} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

$$[Z_{\text{solo}}(\omega)] = \begin{bmatrix} Z_{\text{solo}}_{11} & Z_{\text{solo}}_{12} & \cdots & Z_{\text{solo}}_{1nf} \\ Z_{\text{solo}}_{21} & Z_{\text{solo}}_{22} & \cdots & Z_{\text{solo}}_{2nf} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{\text{solo}}_{nf1} & Z_{\text{solo}}_{nf2} & \cdots & Z_{\text{solo}}_{nf\ nf} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Observa-se que os termos da diagonal principal das matrizes explicitadas de (3.52) a (3.54) são componentes próprios. Logo, a partir das mesmas, descreve-se a forma matricial e complexa:

$$[Z_{\text{solo}}(\omega)] = [\Delta R'(\omega)] + j[\Delta X'(\omega)] \quad (3.55)$$

Nas equações (3.52) a (3.55), o termo (ω) indica a dependência da frequência intrínseca aos parâmetros longitudinais descritos.

3.2.4 Impedância Longitudinal Total da Linha

Após o cálculo das parcelas da impedância longitudinal relativas ao efeito pelicular e solo, bem como as impedâncias externas relativas aos condutores de fase de uma linha genérica, é possível então determinar a impedância própria total para cada condutor e a impedância mútua entre condutores.

A impedância longitudinal própria total relativa a um condutor i de uma linha polifásica é dada como:

$$Z_{ii} = Z_{\text{ext}_{ii}} + Z_{\text{int}_{ii}} + Z_{\text{solo}_{ii}} \quad (3.56)$$

A impedância longitudinal mútua entre dois condutores genéricos i e k de uma linha polifásica é dada por:

$$Z_{ik} = Z_{ki} = Z_{ext_{ik}} + Z_{solo_{ik}} \quad (3.57)$$

Logo, se for considerada uma linha bifásica composta pelos condutores i e k somente, a forma matricial das impedâncias longitudinais totais será descrita da seguinte forma:

$$[\mathbf{Z}(\omega)] = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{ik} \\ Z_{ki} & Z_{kk} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Para uma linha de transmissão com nf fases, a matriz \mathbf{Z} é dada genericamente como:

$$[\mathbf{Z}(\omega)] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1nf} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2nf} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{nf1} & Z_{nf2} & \cdots & Z_{nf\ nf} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

3.3 Admitâncias Transversais da Linha

Considerando a figura 3.3, com nf condutores representando as nf fases de uma linha polifásica, obtém-se as equações relacionadas às capacitâncias transversais.

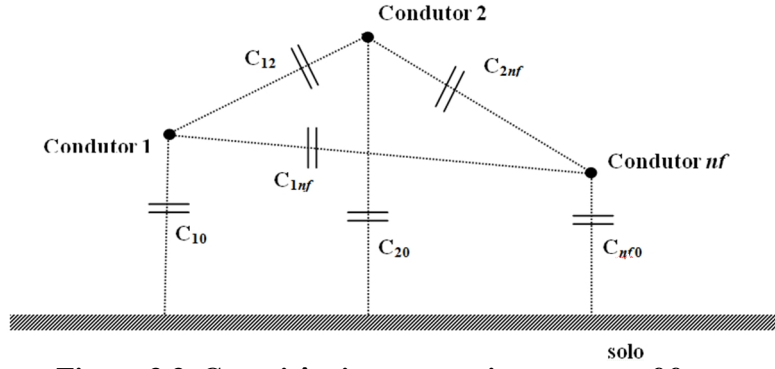


Figura 3.3. Capacitâncias em um sistema com nf fases.

Sabe-se, de acordo com [2], que a diferença de potencial entre o condutor 1 e o solo é dada por:

$$V_1 = (2\pi\epsilon_0)^{-1} \left(q_1 \ln \frac{2h_1}{r_1} + q_2 \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} + \dots + q_{nf} \ln \frac{D_{1nf}}{d_{1nf}} \right) \quad (3.60)$$

Na equação (3.60) q_1 , q_2 , e q_{nf} representam as cargas no primeiro, segundo e nf -ésimo condutor, respectivamente. Estes condutores apresentam raio r com subscritos $1, 2, \dots, nf$ para primeiro, segundo e nf -ésimo respectivamente. De forma análoga, pode-se verificar as equações para os demais condutores do sistema:

$$V_2 = (2\pi\epsilon_0)^{-1} \left(q_1 \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} + q_2 \ln \frac{2h_2}{r_2} + \dots + q_{nf} \ln \frac{D_{2nf}}{d_{2nf}} \right) \quad (3.61)$$

$$V_{nf} = (2\pi\epsilon_0)^{-1} \left(q_1 \ln \frac{D_{1nf}}{d_{1nf}} + q_2 \ln \frac{D_{2nf}}{d_{2nf}} + \dots + q_{nf} \ln \frac{2h_{nf}}{r_{nf}} \right) \quad (3.62)$$

Escrevendo (3.60) a (3.62) na forma genérica matricial, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{nf} \end{bmatrix} = (2\pi\epsilon_0)^{-1} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_1}{r_1} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \dots & \ln \frac{D_{1nf}}{d_{1nf}} \\ \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \ln \frac{2h_2}{r_2} & \dots & \ln \frac{D_{2nf}}{d_{2nf}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{1nf}}{d_{1nf}} & \ln \frac{D_{2nf}}{d_{2nf}} & \dots & \ln \frac{2h_{nf}}{r_{nf}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_{nf} \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

A equação matricial (3.63) pode ser descrita como:

$$[\mathbf{V}] = [\mathbf{p}] [\mathbf{Q}] \quad (3.64)$$

Sendo:

$[\mathbf{V}]$: vetor com o potencial de cada condutor em relação ao solo;

$[\mathbf{p}]$: matriz com os coeficientes de potencial elétrico ou matriz dos coeficientes de campo elétrico.

A partir da definição de capacitância, tem-se:

$$[\mathbf{Q}] = [\mathbf{C}] [\mathbf{V}] \quad (3.65)$$

A partir da expressão (3.64):

$$[\mathbf{Q}] = [\mathbf{p}]^{-1} [\mathbf{V}] \quad (3.66)$$

Igualando as equações (3.65) e (3.66):

$$\begin{aligned} [\mathbf{C}][\mathbf{V}] &= [\mathbf{p}]^{-1}[\mathbf{V}] \\ \therefore [\mathbf{C}] &= [\mathbf{p}]^{-1} \end{aligned} \quad (3.67)$$

Considerando que os condutores da figura 3.3 estão nos potenciais V_1, V_2, \dots e V_{nf} em relação ao solo, as cargas elétricas armazenadas em cada um dos respectivos condutores são:

$$q_1 = (C_{10} + C_{12} + \dots + C_{1nf})V_1 - C_{12}V_2 - \dots - C_{1nf}V_{nf} \quad (3.68)$$

$$q_2 = (C_{21} + C_{20} + \dots + C_{2nf})V_2 - C_{21}V_1 - \dots - C_{2nf}V_{nf} \quad (3.69)$$

$$q_{nf} = (C_{nf1} + C_{nf2} + \dots + C_{nf0})V_{nf} - C_{nf1}V_1 - C_{nf2}V_2 - \dots \quad (3.70)$$

As equações (3.68), (3.69) e (3.70) podem ser descritas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_{nf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{10} + C_{12} + \dots + C_{1nf}) & -C_{12} & \dots & -C_{1nf} \\ -C_{21} & (C_{21} + C_{20} + \dots + C_{2nf}) & \dots & -C_{2nf} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -C_{nf1} & C_{nf2} & \dots & (C_{nf1} + C_{nf2} + \dots + C_{nf0}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{nf} \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

Relacionando a expressão (3.71) com a igualdade (3.67) pode-se concluir que os elementos da diagonal principal correspondem à soma das capacitâncias mútuas entre os nf condutores e a capacitância entre o nf -ésimo condutor e o solo. Com os outros elementos da matriz $[\mathbf{C}]$ capacitâncias mútuas entre pares de condutores.

Com base na definição de admitância e usando notação matricial, tem-se:

$$[\mathbf{Y}] = j\omega[\mathbf{C}] \quad (3.72)$$

A unidade de medida da admitância transversal é $[S \text{ km}^{-1}]$, a condutância transversal é geralmente desprezada no cálculo de parâmetros de linhas e no estudo de alguns tipos de transitórios eletromagnéticos.

3.4 Conclusões

Neste capítulo foi descrito o procedimento usualmente aplicado para o cálculo dos parâmetros elétricos de uma linha polifásica genérica.

Os conceitos de impedância e admitância mútua e própria são introduzidos e devidamente equacionados. O efeito pelicular (*skin effect*), relativo à impedância interna ou própria de um condutor, é representado em função da frequência por meio de uma forma modificada da função de Bessel e o efeito do retorno da corrente através do solo sobre os parâmetros, é representado pelas séries infinitas e trigonométricas de Carson, sendo chamados de termos de correção de Carson.

A partir das impedâncias próprias e mútuas é possível determinar a matriz de impedâncias da linha em função da frequência, com dimensão $n \times n$. E, a partir das admitâncias transversais próprias e mútuas, é possível determinar a matriz de potencial elétrico. Observando que a matriz de potencial é constante e invariável em função da frequência, dependendo exclusivamente dos dados geométricos da linha.

Capítulo 4 Análise Comparativa dos Parâmetros Elétricos da Linha Convencional e da Linha Não-Convencional no Domínio da Frequência

4.1 Introdução

Conforme será visto no presente capítulo, o desempenho elétrico de linhas aéreas de transmissão é altamente depende das características geométricas dos cabos, coordenada das fases, geometria das torres, etc. Tais características estão diretamente ligadas aos parâmetros elétricos das linhas. Bem como as sobretensões de origens diversas, em regime ou em estado transitório.

Levando em conta tais aspectos, são apresentados os resultados do cálculo dos parâmetros elétricos das linhas de transmissão convencional e não-convencional no domínio da frequência. Logo então, são analisados os parâmetros próprios e mútuos, longitudinais e transversais da linha, bem como um estudo sobre o comportamento de ambas as configurações em função da resistividade do solo. E, por fim, uma análise das características de propagação é apresentada para as duas configurações de linha.

Primeiramente, é descrita a configuração de uma linha convencional de 440 kV, mostrada na figura 4.1.

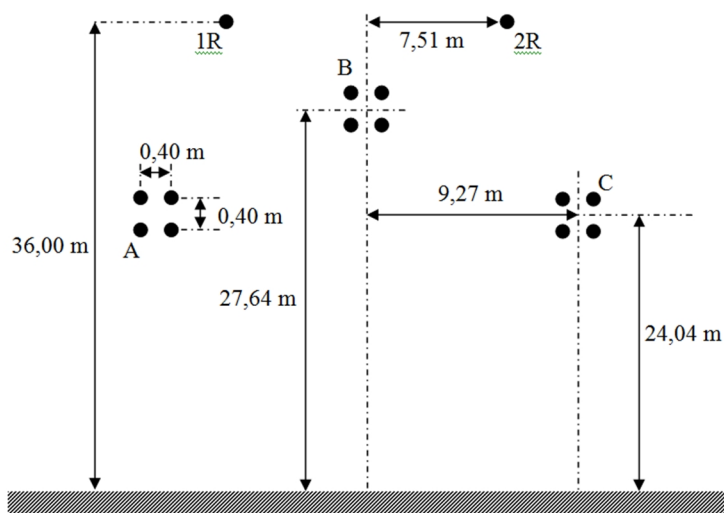


Figura 4.1. Configuração dos feixes condutores da linha convencional.

A linha denominada como não-convencional, no presente trabalho, é descrita de acordo com as seguintes configurações, mostradas na figura 4.2.

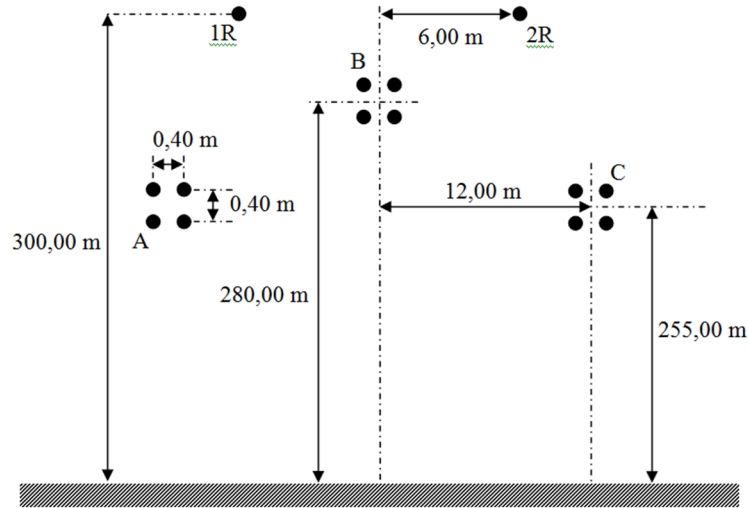


Figura 4.2. Configuração dos feixes condutores da linha não-convencional.

Com base nessas duas configurações, uma completa análise dos parâmetros elétricos e características de propagação é descrita, primeiramente no domínio da frequência e em uma próxima etapa, no domínio do tempo.

4.2 Parâmetros Longitudinais Próprios

Nesse item, são mostradas e analisadas as resistências e indutâncias longitudinais próprias para a representação convencional e não-convencional. Com base nesses parâmetros, calculados de acordo com a metodologia descrita no capítulo 3, as diferenças entre as configurações são mensuradas e estudadas em detalhes.

A figura 4.3 mostra a resistência em função da frequência para a resistividade do solo de $1000 \Omega.m$ com a linha convencional, descrita pela curva em azul. A resistência da representação não-convencional é descrita pela curva em vermelho.

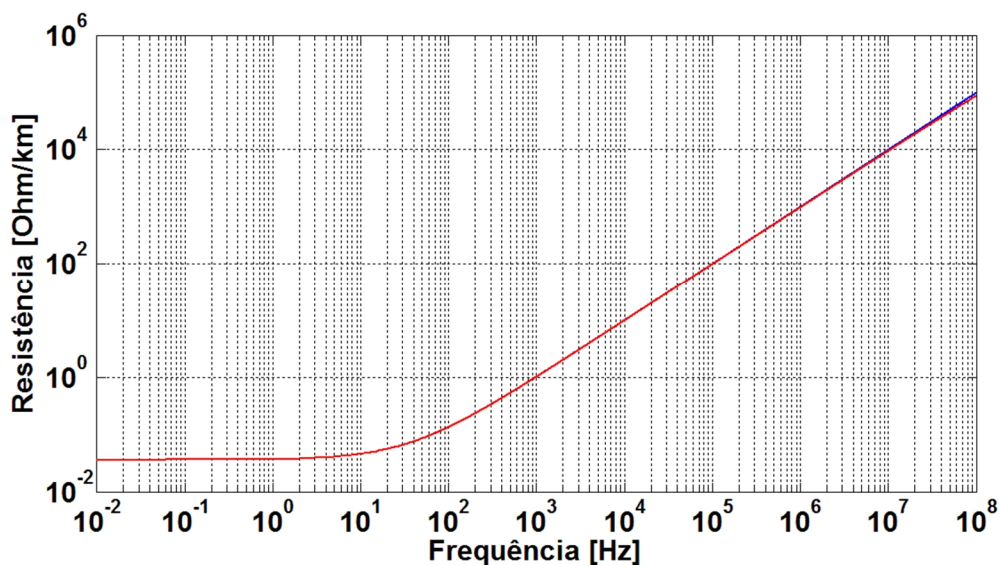


Figura 4.3. Resistência total em função da frequência para resistividade do solo 1000 Ω .m: linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Verifica-se que para frequências abaixo de 1 MHz, as representações apresentam resultados graficamente semelhantes. Porém, para frequências mais elevadas há uma diferença ocasionada principalmente pela diferença de altura das linhas.

Para medir a diferença observada na Figura 4.3, traçou-se a relação entre as resistências por unidade de comprimento das representações convencional e não-convencional, respectivamente, em função da frequência. Tal relação é observada no gráfico da Figura 4.4.

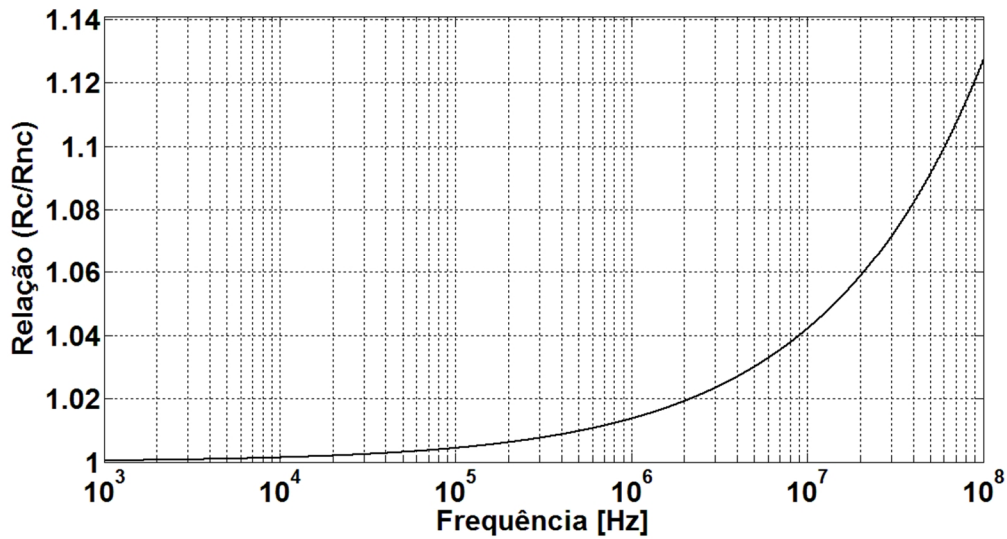


Figura 4.4. Relação entre as resistências da linha convencional (R_c) e não-convencional (R_{nc}) para resistividade do solo $1000 \Omega.m$.

Verifica-se uma maior variação da resistência entre as duas representações para frequências acima de 1 MHz. Como previamente observado na Figura 4.3.

A Figura 4.5 apresenta a variação das resistências, representações convencional e não-convencional, devido ao efeito solo (1) e a variação das resistências em função do efeito pelicular (2).

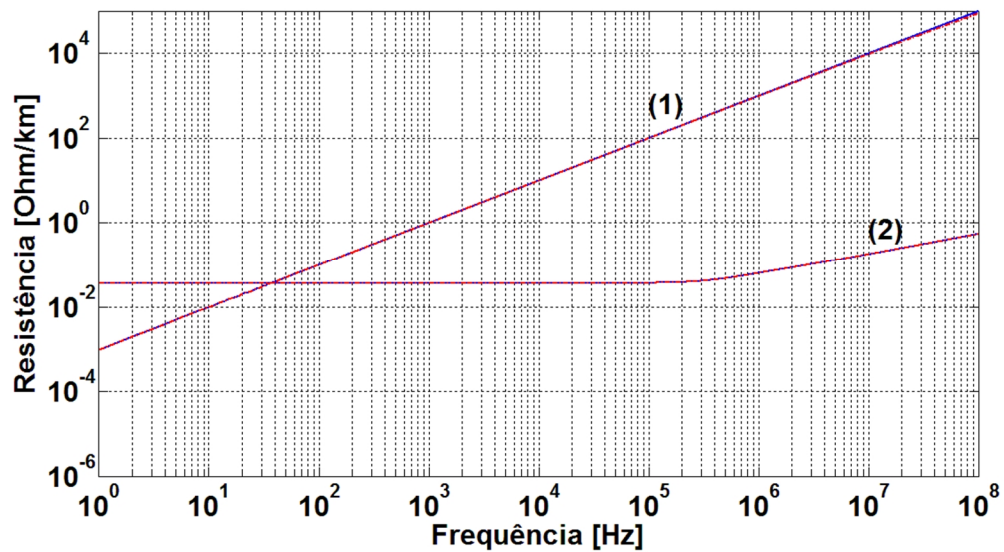


Figura 4.5. Resistências devido ao efeito solo (1) e pelicular (2) para resistividade do solo $1000 \Omega.m$: linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

O efeito pelicular apresenta-se em função das configurações geométricas e físicas do feixe de condutores, ou condutor múltiplo, não estando relacionado à altura e distância entre estes. Logo, são observados valores semelhantes da resistência pelicular em função da frequência, como descrito pelas curvas sobrepostas indicadas por (2).

Já a parcela da resistência total devido ao efeito solo (1) apresenta variação em frequências acima de 1 MHz. O que pode ser explicado pela dependência dessa parcela com relação à profundidade do condutor imagem, que possui a mesma altura do condutor real acima do solo. O efeito da altura pode ser observado nas expressões utilizadas para o cálculo da correção da resistência devido ao efeito da representação do solo. Por meio da equação 3.47, verifica-se que a altura da fase está associada a função δ , que por sua vez está intrinsecamente relacionada ao fator de correção $\Delta R'$, descrito pela equação 3.48.

Em seqüência, o comportamento da resistência de ambas as representações de linha é analisado para diferentes resistividades do solo (10 k Ω .m, 1000 Ω .m, 100 Ω .m).

A Figura 4.6 mostra a variação da resistência em função da frequência para cada resistividade do solo dada anteriormente.

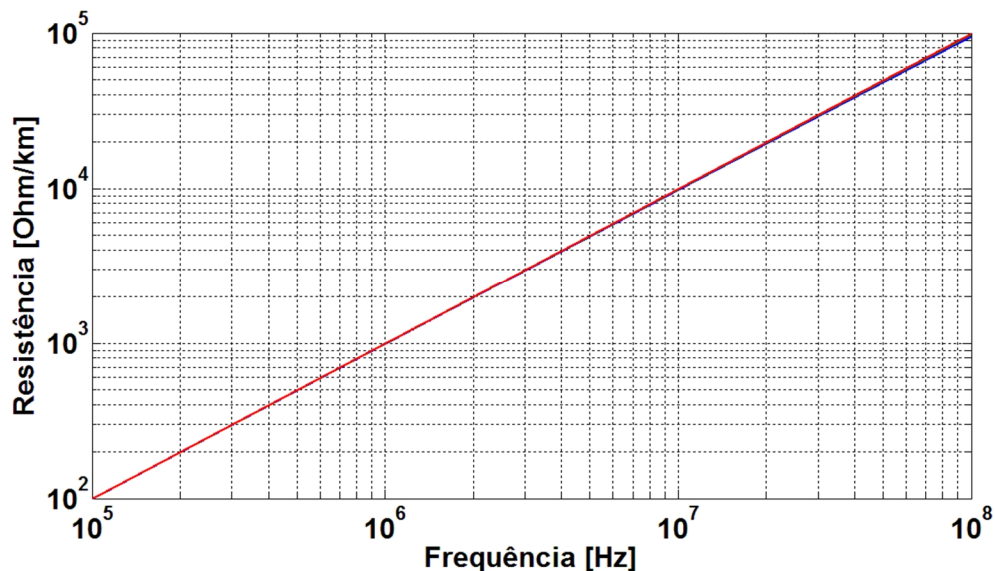


Figura 4.6. Variação da resistência total (linha convencional) com a resistividade do solo: Curva vermelha (10 k Ω .m), curva verde (1000 Ω .m) e curva azul (100 Ω .m).

Pode-se observar que para a linha convencional há pequenas variações do valor resistivo para diferentes resistividades do solo.

A seguir, a Figura 4.7 representa as resistências da linha não-convencional para as mesmas resistividades do solo analisadas anteriormente.

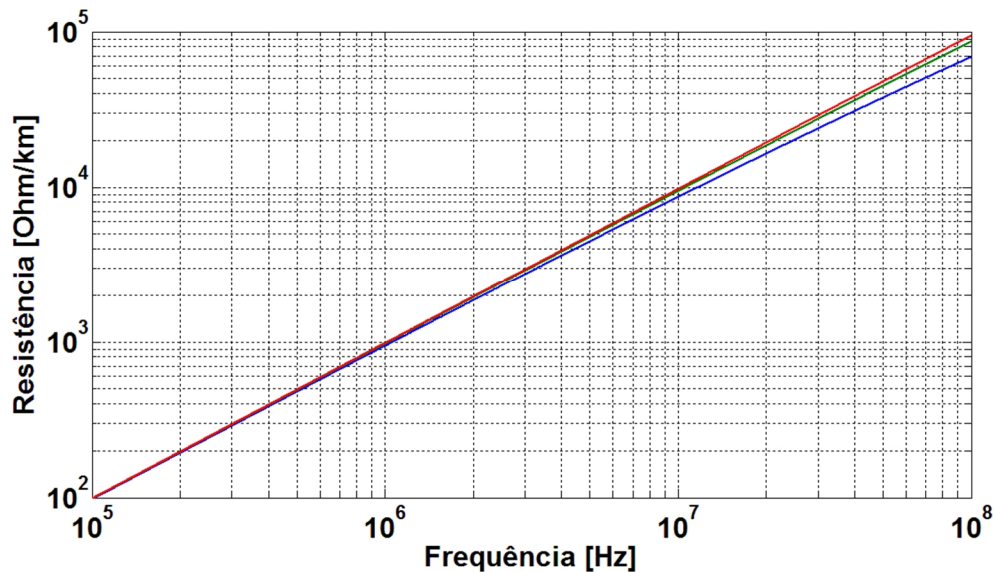


Figura 4.7. Variação da resistência total (linha não-convencional) com a resistividade do solo: Curva vermelha ($10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$), curva verde ($1000 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$) e curva azul ($100 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$).

Pode-se notar que a resistência varia de forma mais acentuada, tendendo a valores menores com o aumento da frequência quando comparado com os valores da linha convencional.

Outro fato a se destacar é que para resistividades pequenas há uma maior influência na mudança da resistência para a linha não-convencional, fazendo com que seu valor seja mais baixo quando comparado com a linha convencional.

A fim de mostrar de forma mais clara a variação da resistência em função da frequência, para as resistividades do solo consideradas anteriormente. A relação da Figura 4.4 é descrita para diferentes resistividades do solo na Figura 4.8.

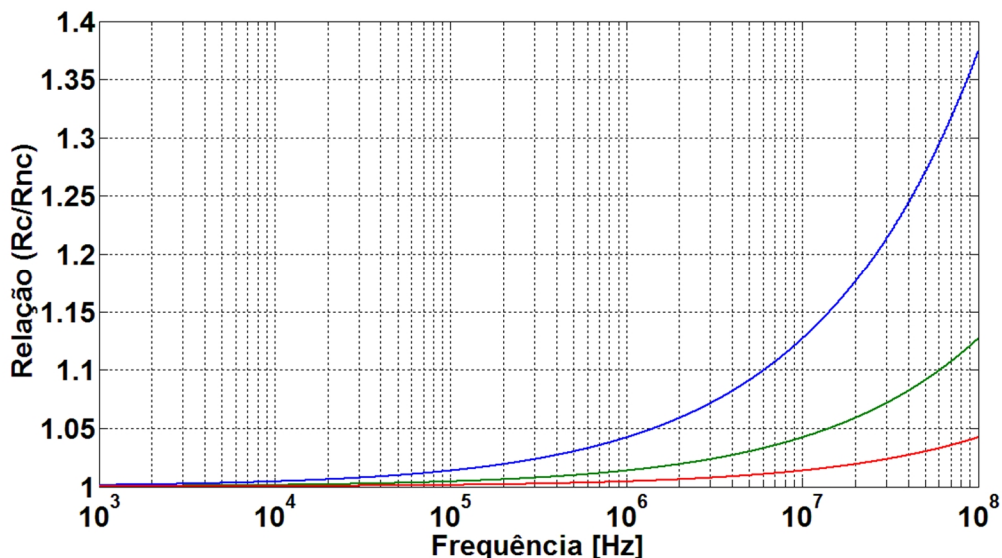


Figura 4.8. Relação entre as resistências da linha convencional (R_c) e não-convencional (R_{nc}):
Curva vermelha (10 kΩ.m), curva verde (1000 Ω.m) e curva azul (100 Ω.m).

Nota-se que o aumento da resistividade do solo tende a diminuir as diferenças nos valores de resistência das configurações analisadas. Ficando evidente que para resistividade do solo de 100 Ω.m a diferença chega a mais de 10% para frequências em torno de 5 MHz.

Posteriormente a análise dos resultados de resistência própria total por unidade de comprimento, apresenta-se os resultados obtidos para a indutância longitudinal.

Primeiramente, são mostradas as curvas da indutância total por unidade de comprimento da linha convencional (azul) e não-convencional (vermelho).

Nota-se, com base na Figura 4.9, que o perfil das duas curvas tem o mesmo comportamento, apresentando uma queda com o aumento da frequência. Observa-se também que a indutância para a linha convencional apresenta valores mais elevados quando comparado com a configuração não-convencional.

A fim de mostrar como se dá a relação entre as indutâncias das linhas convencional e não-convencional em função da frequência, foi traçada a curva da Figura 4.10. Nessa imagem pode-se notar uma diferença já para pequenas frequências decorrente das formas das curvas da Figura 4.9, sendo crescente com o aumento da frequência.

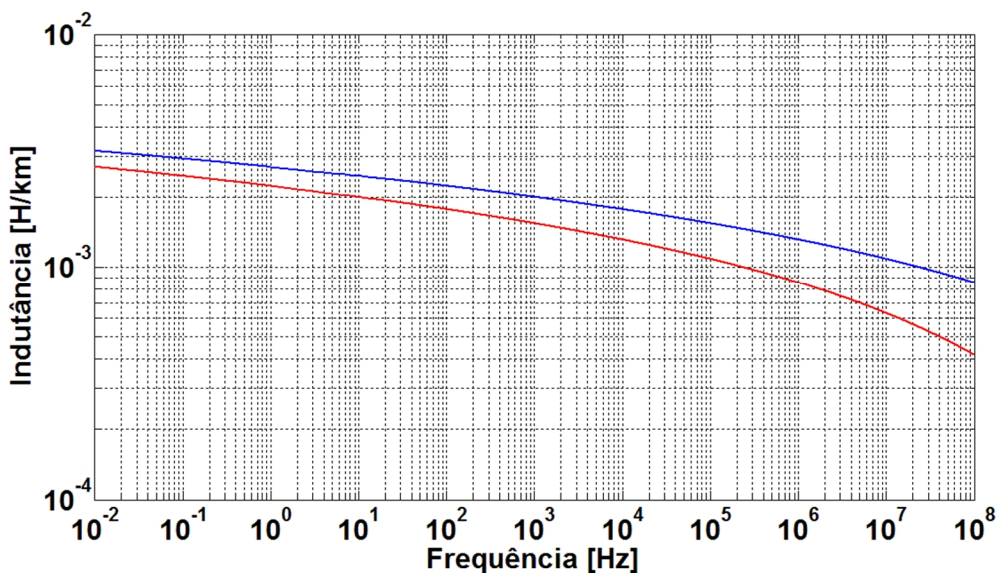


Figura 4.9. Indutância total para resistividade do solo 1000 Ω .m: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

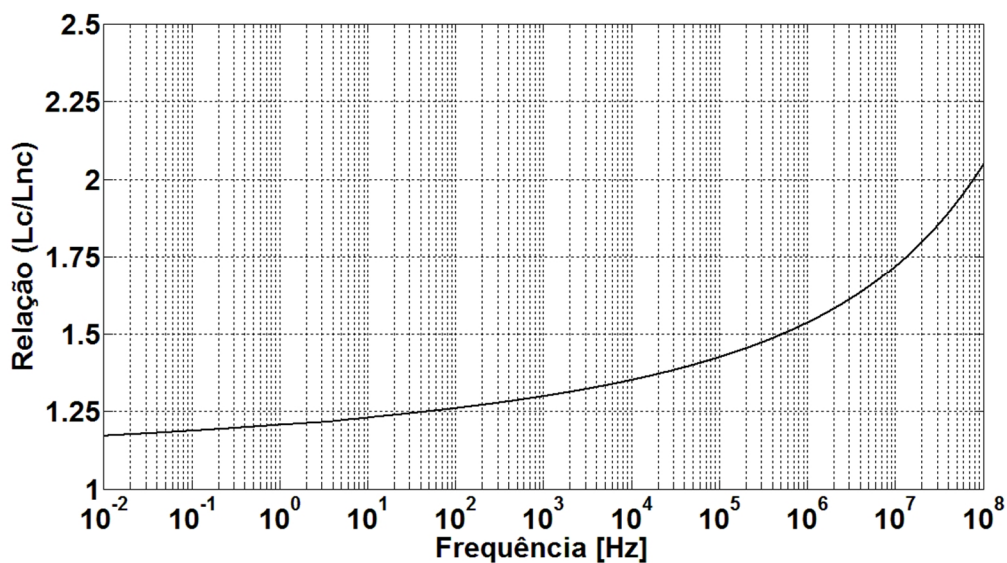


Figura 4.10. Relação entre as indutâncias da linha convencional (L_c) e não-convencional (L_{nc}) para resistividade do solo 1000 Ω .m.

Observa-se que as diferenças apresentadas pelas indutâncias estão em torno de 50% na comparação da linha convencional para a linha não-convencional em frequências em torno de 1 MHz. Fato que pode representar mudanças nos perfis das ondas propagantes por essas linhas, uma vez que a indutância é um dos fatores que influenciam na formação da função de fase.

Com o intuito de investigar como as componentes que formam a indutância influenciam na formação da indutância total, foi traçado o gráfico da Figura 4.11. O que se pode observar é que a indutância devido ao efeito pelicular (2) é a mesma para as duas configurações, assim como ocorrido com a resistência. Pois, pelo mesmo motivo apresentado anteriormente, a indutância devido ao efeito pelicular depende exclusivamente da geometria dos condutores, feixe e de suas características físicas.

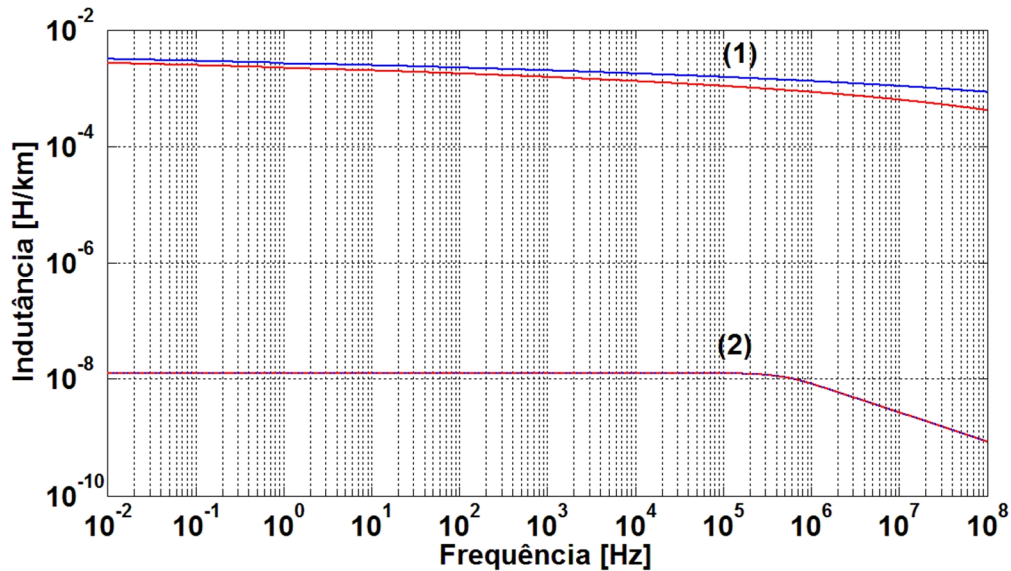


Figura 4.11. Indutância devido ao efeito solo (1) e efeito pelicular (2) para resistividade do solo 1000 $\Omega\cdot\text{m}$: linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Contudo a parcela da indutância devida ao efeito solo (1) apresenta diferença para todo o espectro de frequências analisado, o que pode ser explicado novamente pela dependência dessa parcela com relação à profundidade do condutor imagem, que possui a mesma altura do condutor real acima do solo.

A diferença que ocorre na análise da indutância com relação a resistência é o fato do primeiro parâmetro apresentar uma diferença inicial já para as frequências de ordem mais baixa, o que não ocorre para a resistência a qual apresenta uma diferença somente para altas frequências.

A etapa seguinte foi a análise da indutância para as três resistividades do solo anteriormente citados no trabalho, variando de 10 $\text{k}\Omega\cdot\text{m}$, 1000 $\Omega\cdot\text{m}$ e 100 $\Omega\cdot\text{m}$. A Figura 4.12 mostra como a indutância varia de acordo com a resistividade do solo.

Nota-se que para todo o espectro de frequências, para diferentes resistividades do solo, a indutância apresenta valores distintos. Onde valores de resistividade menores têm um menor valor da indutância para a linha convencional.

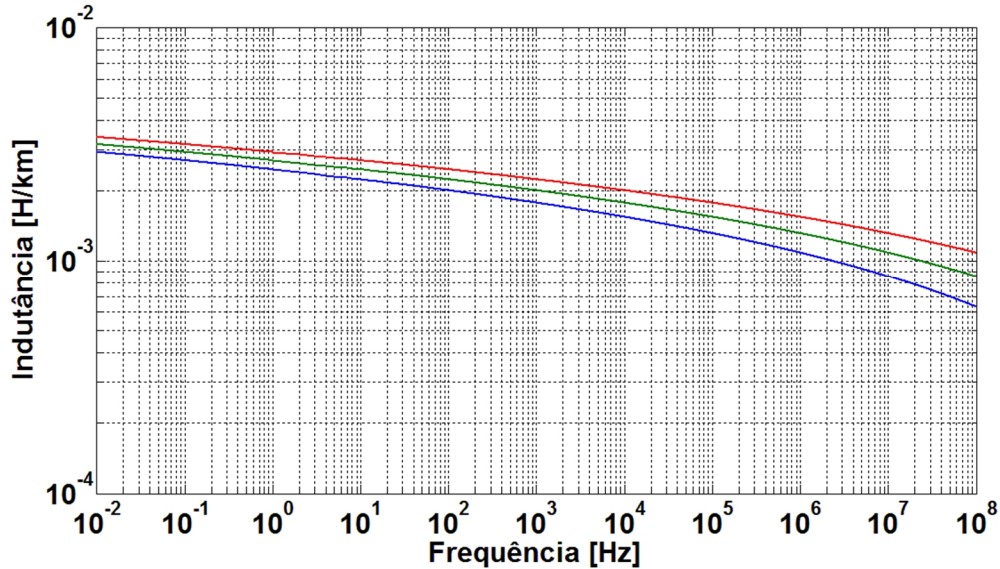


Figura 4.12. Variação da indutância total (linha convencional) com a resistividade do solo: Curva vermelha ($10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$), curva verde ($1000 \Omega\cdot\text{m}$) e curva azul ($100 \Omega\cdot\text{m}$).

O mesmo procedimento realizado para a Figura 4.12 foi reproduzido para a configuração não-convencional, apresentada na Figura 4.13. As curvas apresentadas nessa figura se mostram com perfil de queda mais acentuado quando comparadas com as curvas da Figura 4.12. Apresentando valores de indutâncias mais baixos para as mesmas resistividades de solo.

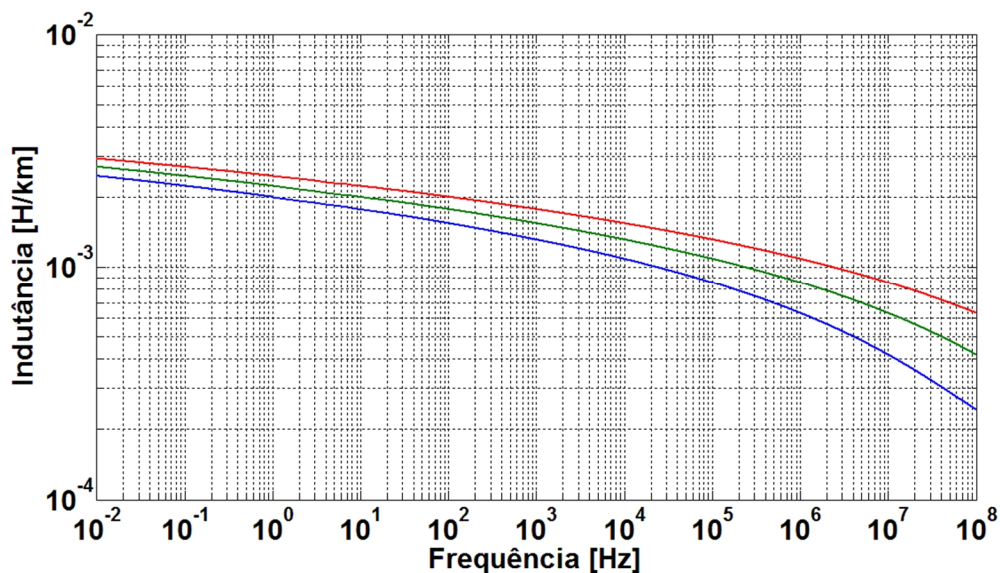


Figura 4.13. Variação da indutância total (linha não-convencional) com a resistividade do solo:
Curva vermelha ($10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$), curva verde ($1000 \Omega\cdot\text{m}$) e curva azul ($100 \Omega\cdot\text{m}$).

A fim de se observar como a diferença das indutâncias ocorre para as duas configurações foi traçado a relação entre os parâmetros, mostrada na Figura 4.14.

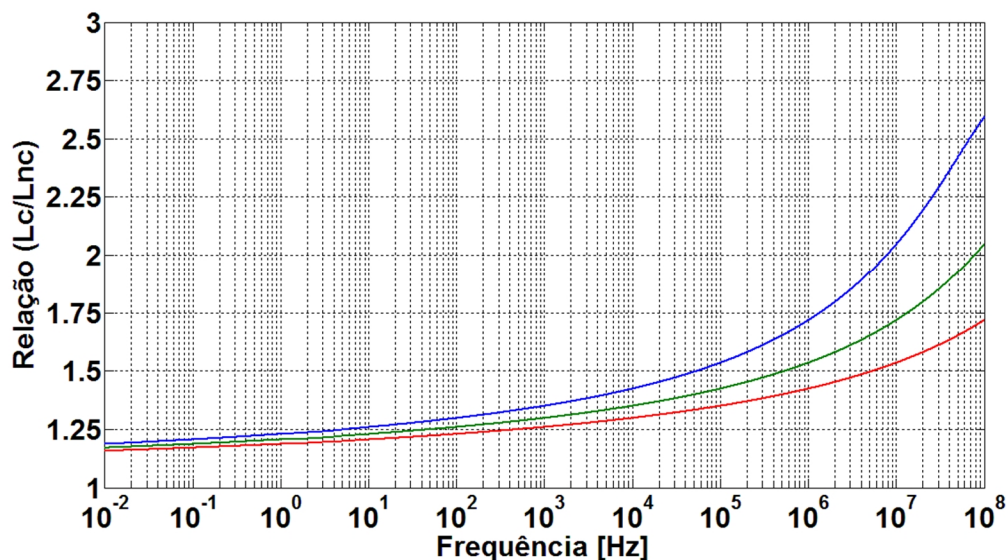


Figura 4.14. Relação entre as resistências da linha convencional (L_c) e não-convencional (L_{nc}):
Curva vermelha ($10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$), curva verde ($1000 \Omega\cdot\text{m}$) e curva azul ($100 \Omega\cdot\text{m}$).

O que se pode observar é que para a resistividade do solo mais baixa (curva azul) a indutância apresenta uma maior variação na comparação entre as linhas. Apresentando a configuração convencional indutâncias mais elevadas para todo espectro de frequência analisado, chegando a ser 75% maior, em magnitude, quando comparado com a linha não-convencional em frequências em torno de 1 MHz.

Após a análise das indutâncias próprias das configurações convencional e não-convencional, dentro de um espectro de frequências determinado. Foi feito um estudo de como a indutância varia em função da resistividade do solo. Considerando para tal a frequência fundamental de 60 Hz.

A Figura 4.15 mostra a não linearidade da indutância com relação à resistividade do solo. A curva azul representa a variação da indutância para a configuração convencional e a linha em vermelho para a não-convencional.

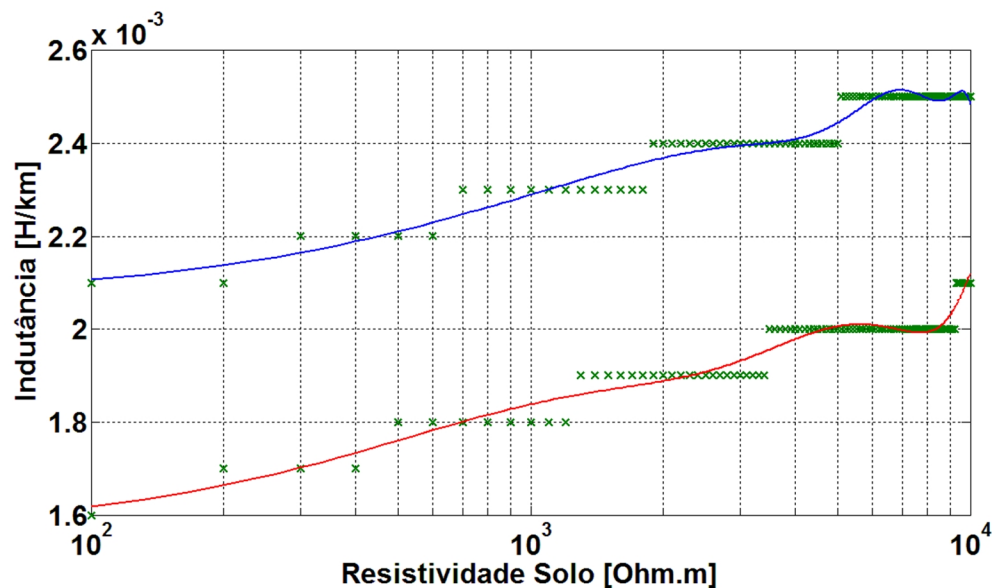


Figura 4.15. Variação da indutância total a 60 Hz em função da resistividade do solo: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

O traçado das curvas foi feito usando um polinômio de 8ª ordem, pois somente alguns pontos de resistividade foram usados para a obtenção do gráfico. Pode-se observar que a

característica da indutância em 60 Hz com relação a resistividade do solo é não-linear. Variando de forma mais acentuada para resistividades mais baixas.

Nota-se que a indutância calculada em 60 Hz das duas linhas difere de tal forma, que a linha convencional apresenta um valor mais elevado com relação à configuração não-convencional. Fato já observado anteriormente pelas figuras 4.12, 4.13 e 4.14.

4.3 Parâmetros Longitudinais Mútuos

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos efetuados para os parâmetros mútuos das duas configurações de linha. A Figura 4.16 representa a variação da resistência mútua entre fases consecutivas, com relação à frequência. A curva azul representa a configuração convencional e a curva em vermelho a não-convencional. Pode-se observar que a curva em vermelho apresenta um desvio a partir de 5 MHz crescente com o aumento da frequência.

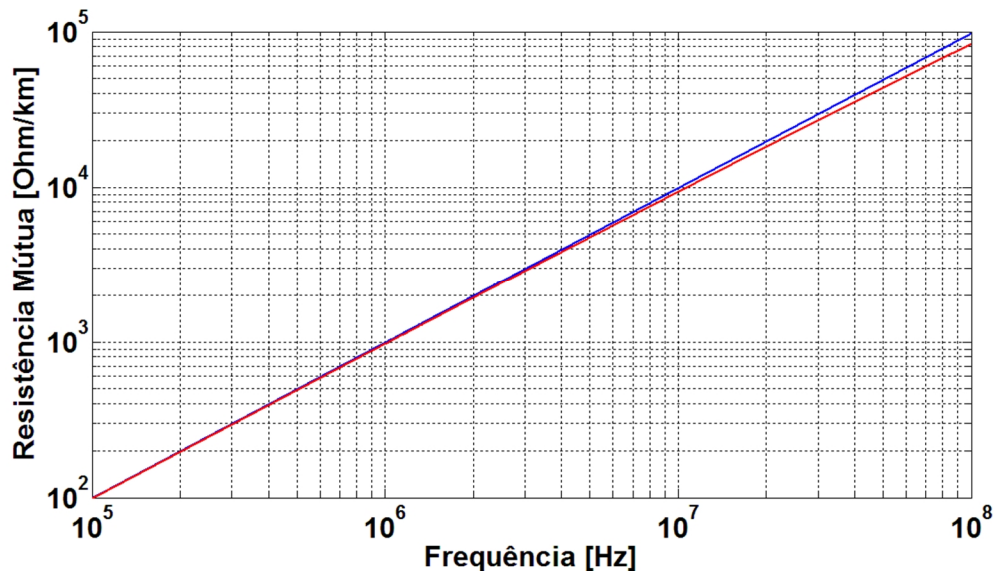


Figura 4.16. Resistência mútua fases consecutivas para resistividade do solo $1000 \Omega.m$: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva em vermelho).

Após a apresentação da resistência mútua entre as fases mais próximas, foi traçado o gráfico da Figura 4.17, que mostra os resultados para as fases mais distantes. Pode-se observar o mesmo comportamento ocorrido na Figura 4.16, porém com menor diferença entre as curvas. Uma vez que essas fases são mais afastadas, como mostrado na configuração da torre da figura 4.1.

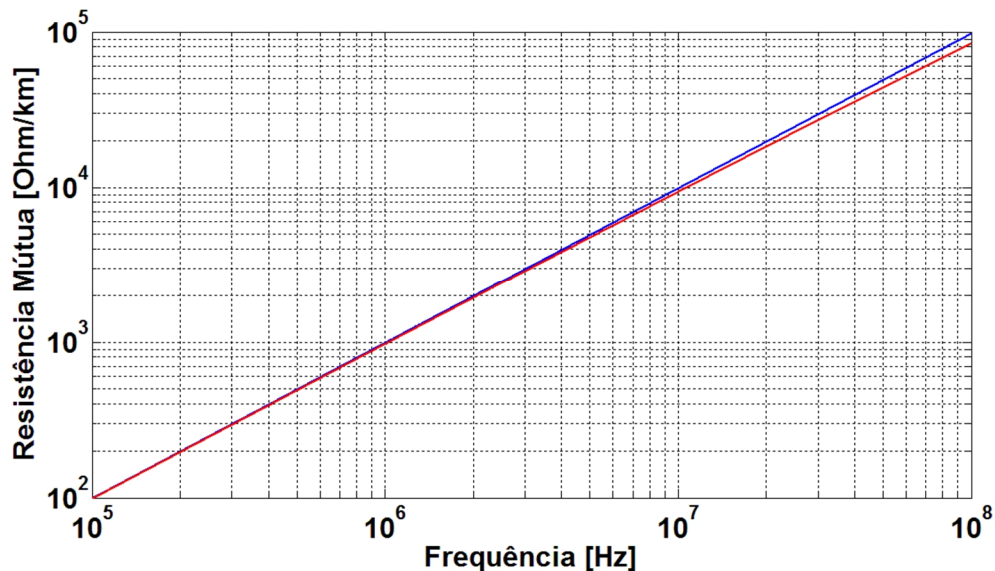


Figura 4.17. Resistência mútua fases mais distantes para resistividade do solo 1000 $\Omega\cdot\text{m}$: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva em vermelho).

A fim de se mostrar mais claramente a diferença apresentada pelas resistências mútuas, para as configurações convencional e não-convencional, traçou-se na Figura 4.18 a relação entre as resistências mútuas entre as fases mais próximas (curva azul) e entre as fases mais distantes (curva vermelha).

O que pode ser observado na Figura 4.18 é um valor mais elevado da relação para as fases mais próximas quando comparado com as fases mais afastadas. Fato que mostra como a diferença de distância entre as fases influencia na composição da resistência mútua.

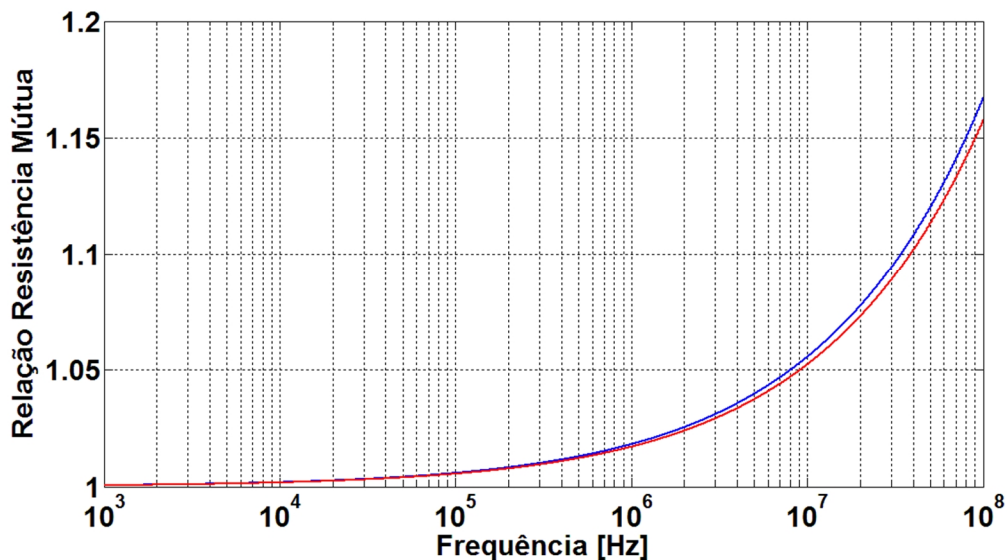


Figura 4.18. Relação entre resistências mútuas linha convencional e não-convencional para resistividade do solo 1000 Ω.m: Fases próximas (curva azul) e fases mais distantes (curva em vermelho).

A seguir na Figura 4.19 a variação da resistência mútua entre as fases consecutivas da configuração convencional em função da frequência é mostrada para resistividades do solo consideradas no item 4.2.

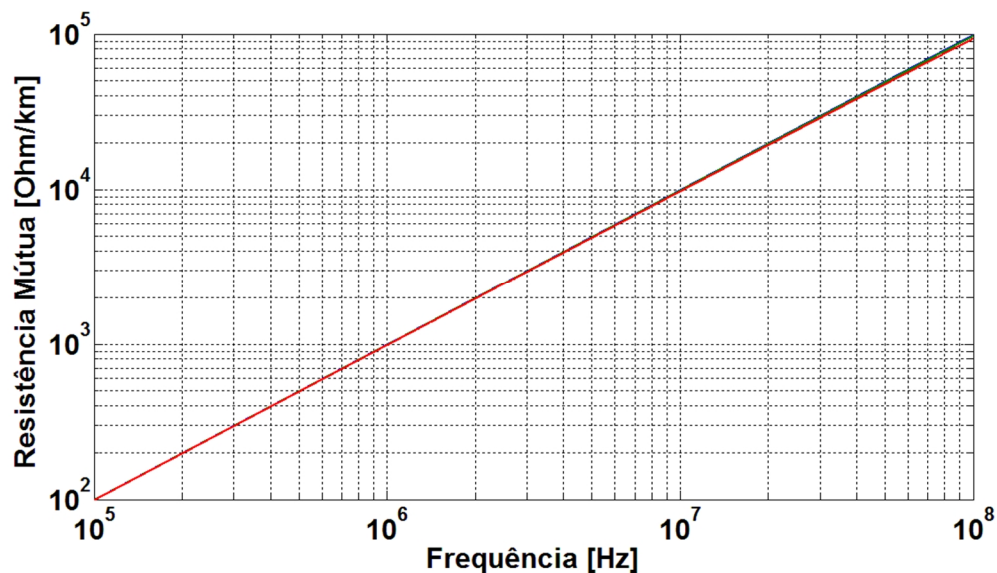


Figura 4.19. Resistência mútua fases consecutivas (linha convencional) em função da resistividade do solo: Curva vermelha (100 Ω.m), curva verde (1000 Ω.m) e curva azul (10 kΩ.m).

Nota-se na Figura 4.19 que a resistividade do solo para as fases mais próximas quase não é alterada para as resistividades do solo estudadas, aumentando-se a frequência.

A Figura 4.20 representa as curvas de resistência mútua para as fases consecutivas da configuração não-convencional. Considerando as mesmas resistividades do solo da Figura 4.19.

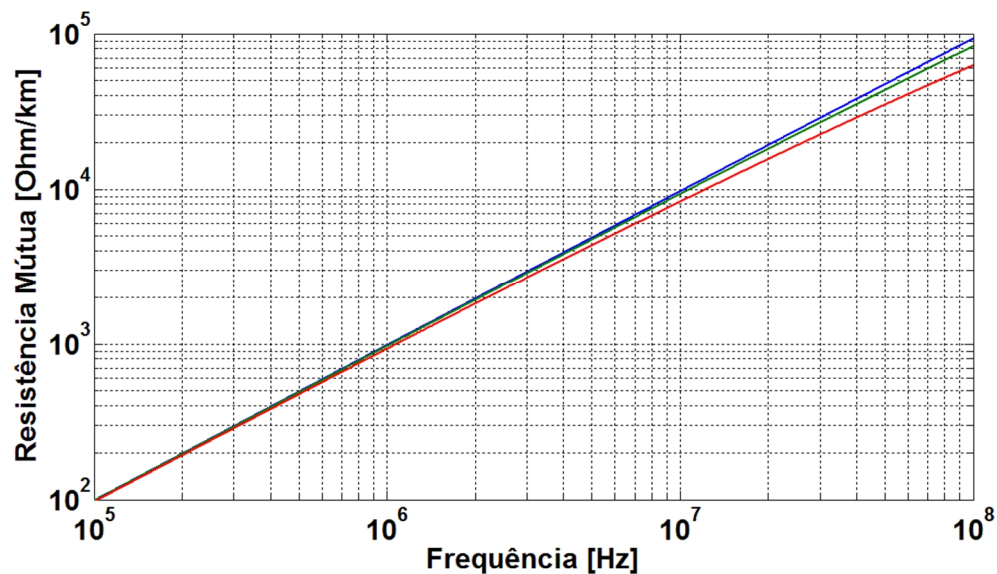


Figura 4.20. Resistência mútua fases consecutivas (linha não-convencional) em função da resistividade do solo: Curva vermelha (100 Ω .m), curva verde (1000 Ω .m) e curva azul (10 k Ω .m).

Observa-se na Figura 4.20 a sensibilidade da configuração não-convencional para resistividades do solo de valores mais baixos. Apresentando, para frequências acima de 10 MHz valores bem disitintos dos obtidos para a configuração convencional, Figura 4.19.

A fim de se obter quantitativamente os valores das diferentes respostas encontradas nas figuras 4.19 e 4.20, causadas pelas resistividades de solo, foi traçado o gráfico da Figura 4.21. Que mostra a relação entre a linha convencional e não-convencional para a as três resistividades de solo simuladas no trabalho.

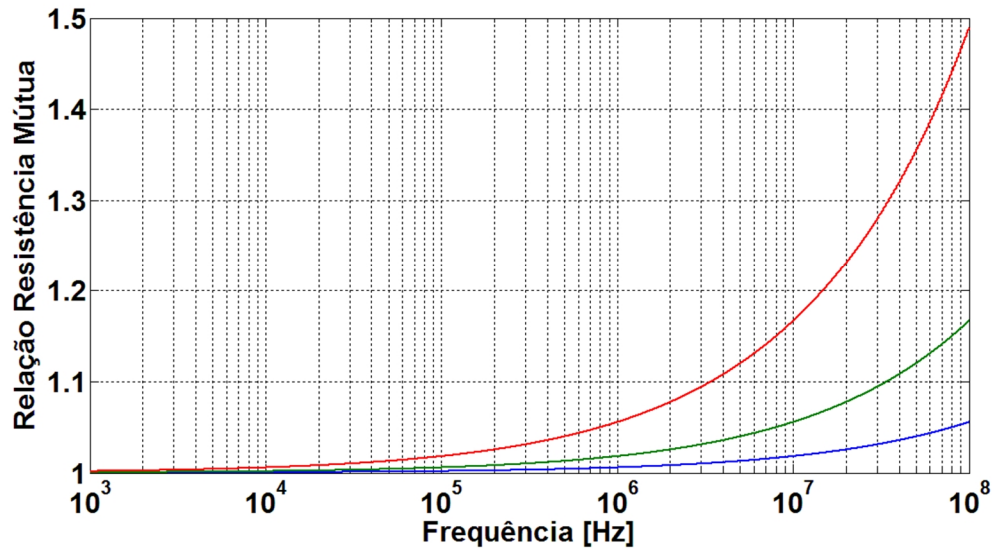


Figura 4.21. Relação entre as resistências mútuas fases consecutivas, convencional e não-convencional: Curva vermelha (100 Ω.m), curva verde (1000 Ω.m) e curva azul (10 kΩ.m).

Na Figura 4.21 a curva em vermelho representa a relação das resistências mútuas entre as configurações convencional e não-convencional para a resistividade do solo de 100 Ω.m, a curva em verde 1000 Ω.m e a curva em azul 10 kΩ.m. Pode-se notar que a uma menor resistividade de solo sensibiliza mais os valores de resistência dos condutores mais elevados da configuração não-convencional, assim como visto para as análises da resistência própria.

Seguindo para a apresentação dos resultados das fases mais distantes das configurações. Tem-se na Figura 4.22 a variação da resistência mútua com relação a frequência, para as resistividades do solo anteriormente analisadas, com respeito a configuração convencional. Nessa figura a curva vermelha representa 100 Ω.m, a curva verde 1000 Ω.m e a curva azul 10 kΩ.m.

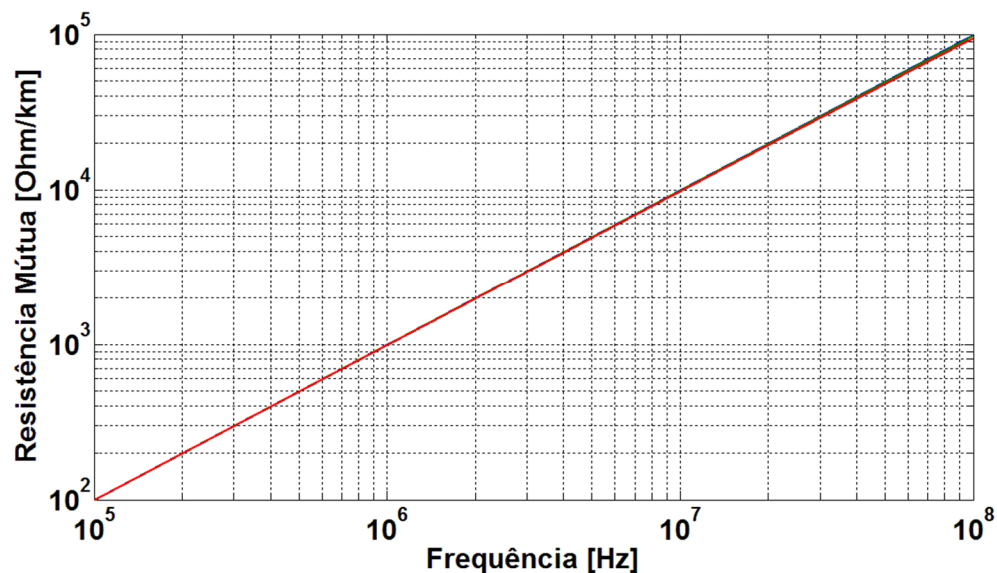


Figura 4.22. Resistência mútua fases distantes (linha convencional) em função da resistividade do solo: Curva vermelha ($100 \Omega.m$), curva verde ($1000 \Omega.m$) e curva azul ($10 \text{ k}\Omega.m$).

A Figura 4.23 mostra as curvas, para mesmas resistividades de solo da Figura 4.22, das fases mais afastadas levando em conta a configuração não-convencional.

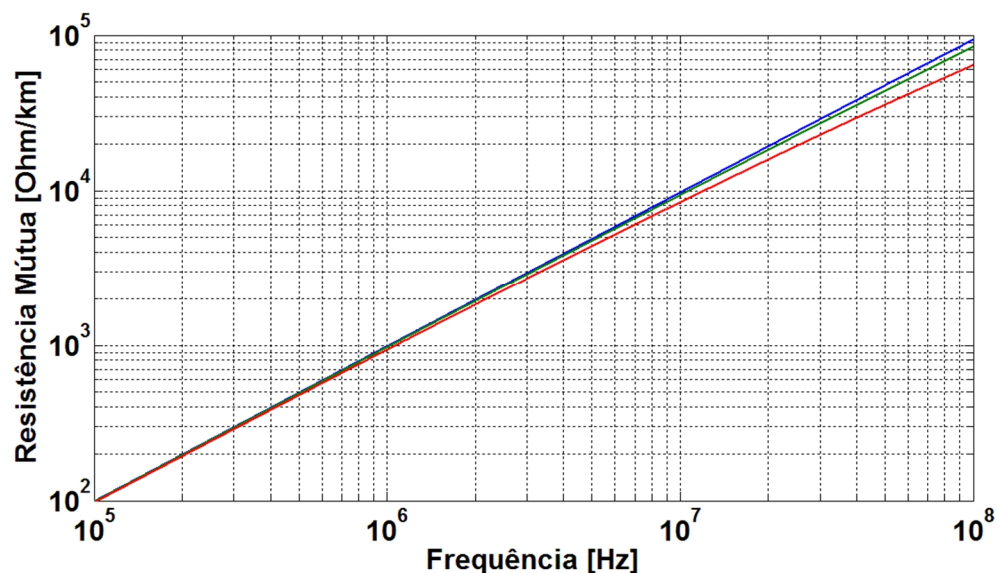


Figura 4.23. Resistência mútua fases mais distantes (linha não-convencional) em função da resistividade do solo: Curva vermelha ($100 \Omega.m$), curva verde ($1000 \Omega.m$) e curva azul ($10 \text{ k}\Omega.m$).

Nota-se que a resistência para essa linha apresenta valores distintos de resistência para frequências superiores a 2 MHz, quando variada a resistividade do solo.

A fim de também, se obter para essas fases, uma resposta mais precisa sobre como as diferentes resistividades influenciam a resistência mútua. Foi traçado o gráfico da Figura 4.24, onde se encontra a relação entre a linha convencional e não-convencional para as três resistividades de solo simuladas. A curva em vermelho representa novamente a relação para a resistividade de 100 $\Omega.m$, a curva em verde 1000 $\Omega.m$ e a curva em azul 10 k $\Omega.m$.

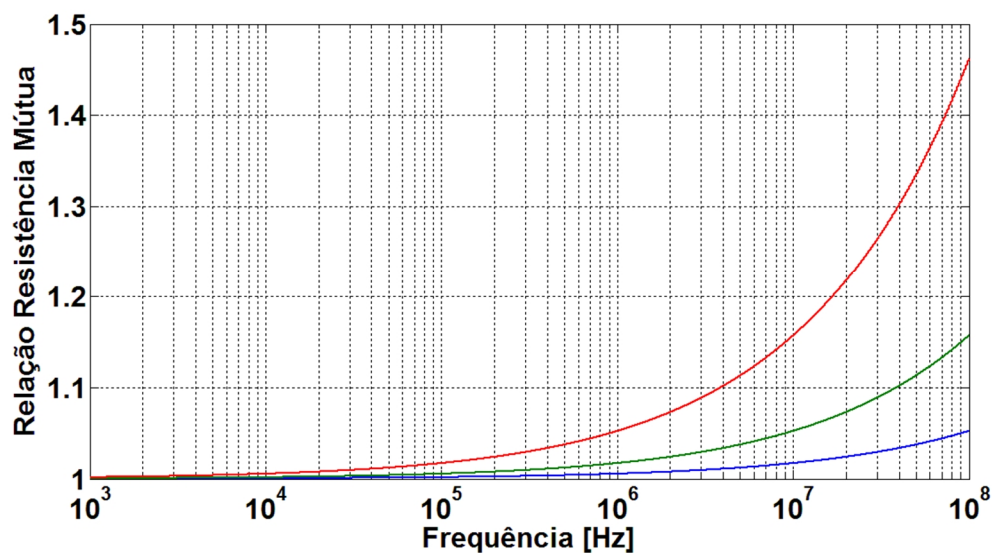


Figura 4.24. Relação entre as resistências mútuas fases mais distantes, linha convencional e não-convencional: Curva vermelha (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva azul (10 k $\Omega.m$).

Pode-se notar que a tendência da menor resistividade de solo influenciar mais na variação do valor de resistência entre as configurações das linhas, que foi vista na Figura 4.21, se mantém para a análise da resistência mútua das fases mais distantes.

Terminada as análises para as resistências mútuas entre as fases passa-se agora para a observação dos resultados referentes aos valores das indutâncias mútuas. Na Figura 4.25 tem-se mostrado a indutância mútua entre as fases consecutivas para a linha convencional (curva azul) e não-convencional (curva em vermelho).

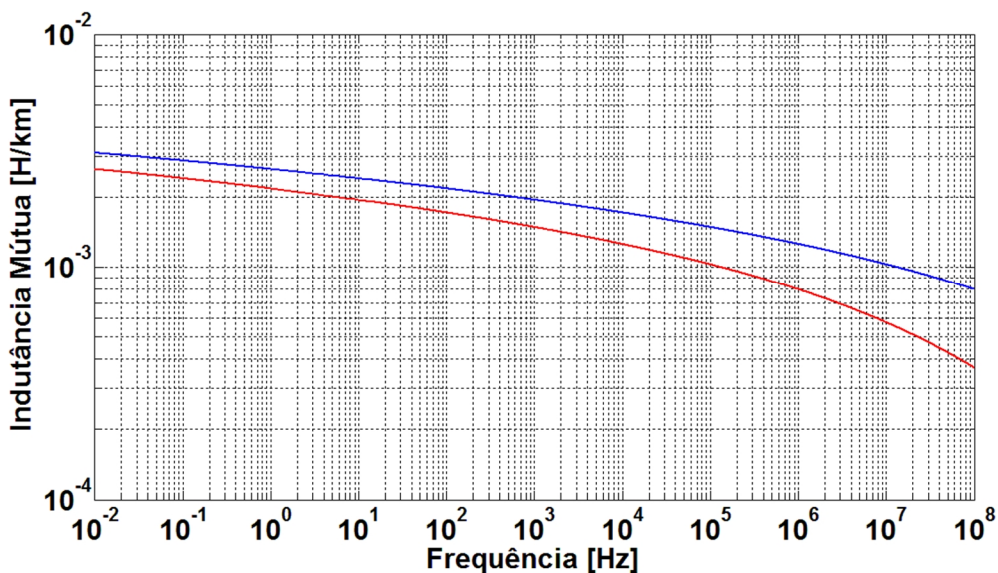


Figura 4.25. Indutância mútua fases consecutivas para resistividade do solo 1000 Ω .m: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva em vermelho).

Pode ser notado, pela observação da Figura 4.25, o mesmo comportamento apresentado pela indutância própria representada na Figura 4.9. Apresentando apenas diferença no valor de magnitude para a indutância mútua.

O mesmo ocorre na Figura 4.26, para a indutância mútua entre as fases mais distantes entre si, que apresenta as curvas mais próximas quando comparadas com a indutância mútua entre as fases consecutivas.

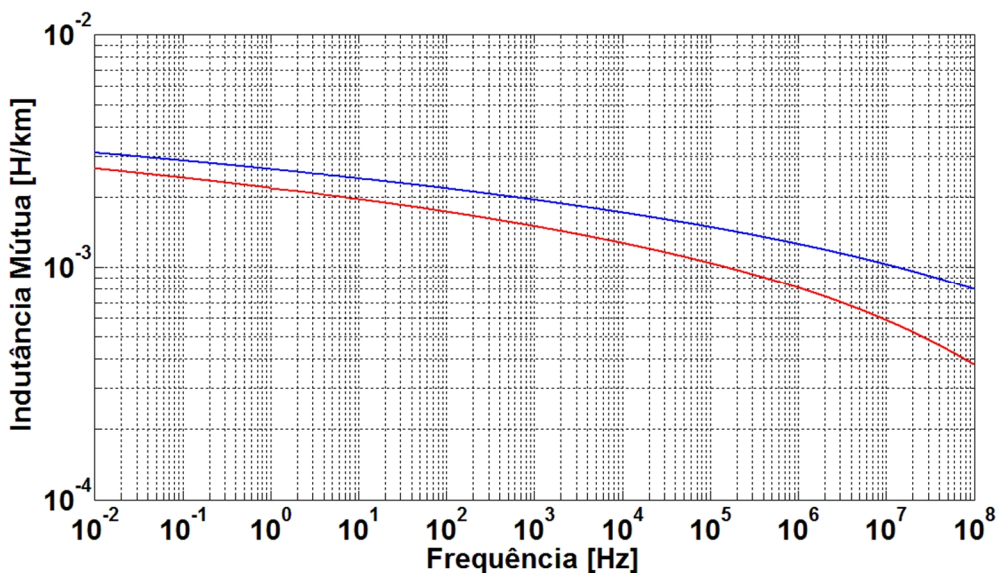


Figura 4.26. Indutância mútua fases mais distantes para resistividade do solo $1000 \Omega.m$: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva em vermelho).

A relação entre as indutâncias mútuas está mostrada na Figura 4.27 e foi traçada para a observação da variação com relação a distância das fases. Sendo a curva em azul a representação da relação da indutância mútua entre as fases consecutivas, da linha convencional. E a curva em vermelho representando a mesma relação só que para a mútua entre fases mais distantes.

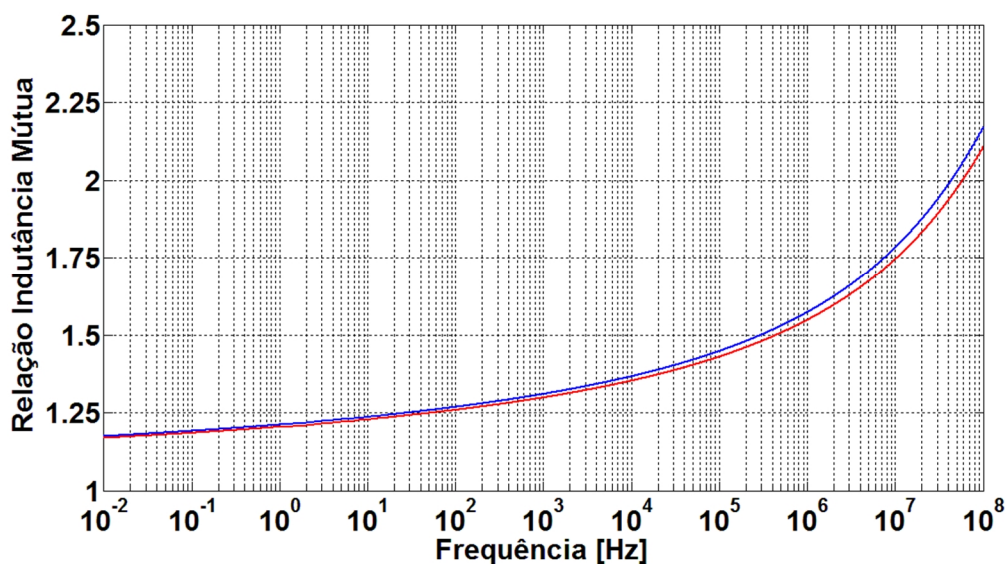


Figura 4.27. Relação entre indutâncias mútuas linha convencional e não-convencional para resistividade do solo $1000 \Omega.m$: Fases consecutivas (curva azul) e fases distantes (curva em vermelho).

Pode-se observar que a relação (convencional/não-convencional) entre as indutâncias mútuas das fases consecutivas apresenta valores maiores que os valores das fases mais afastadas.

Aqui, retoma-se o estudo levando em conta a variação da resistividade do solo para os parâmetros mútuos das configurações das linhas analisadas. A Figura 4.28 tem por objetivo mostrar a variação da indutância mútua entre as fases consecutivas da linha convencional, para três resistividades do solo: Curva vermelha: 100 $\Omega.m$. Curva verde: 1000 $\Omega.m$. Curva azul: 10 k $\Omega.m$.

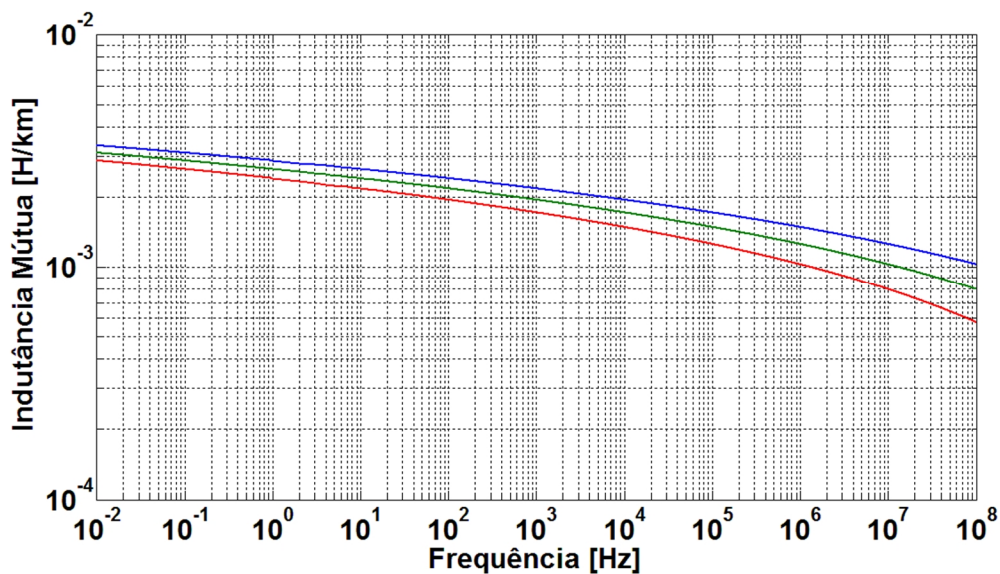


Figura 4.28. Indutância mútua fases consecutivas (linha convencional) em função da resistividade do solo: Curva vermelha (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva azul (10 k $\Omega.m$).

Nota-se na Figura 4.28 que quanto menor for a resistividade do solo em que a linha se encontra, menor será o valor da indutância mútua entre as fases consideradas. Fato anteriormente observado para a indutância própria no item 4.2.

O mesmo procedimento foi adotado para a configuração não-convencional. Obtendo-se assim o gráfico da Figura 4.29 que representa a variação da indutância em função da frequência, para as resistividades de solo já apresentadas.

E a relação entre as indutâncias para as duas configurações de torre, considerando-se as fases mais próximas estão mostradas na Figura 4.30.

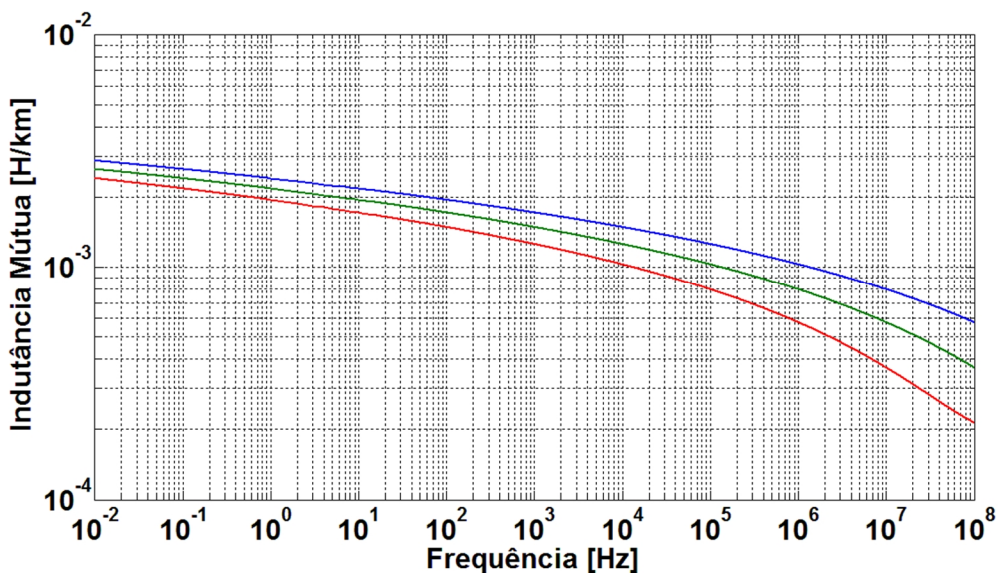


Figura 4.29. Indutância mútua fases consecutivas (linha não-convencional) em função da resistividade do solo: Curva vermelha (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva azul (10 k $\Omega.m$).

Nota-se, da figura 4.29, que o comportamento das indutâncias com a variação da resistividade do solo para a configuração não-convencional torna-se mais drástica quando comparado com a linha convencional. Apresentando valores de indutâncias mais baixos para todo o espectro de frequência analisado.

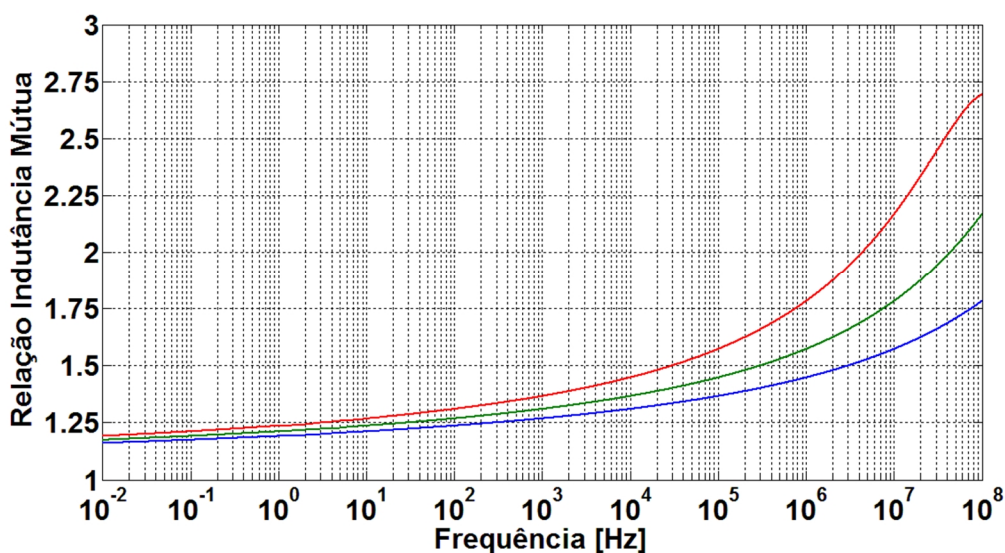


Figura 4.30. Relação entre as indutâncias mútuas fases consecutivas, linha convencional e não-convencional: Curva vermelha (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva azul (10 k $\Omega.m$).

Pela relação da indutância mútua entre as fases mais próximas entre as linhas, da figura 4.30, observar-se, para a resistividade do solo de $100 \Omega.m$, que o valor chega a 100% em 3 MHz.

A figura 4.31 representa a variação da indutância mútua da linha convencional referente as fases mais afastadas.

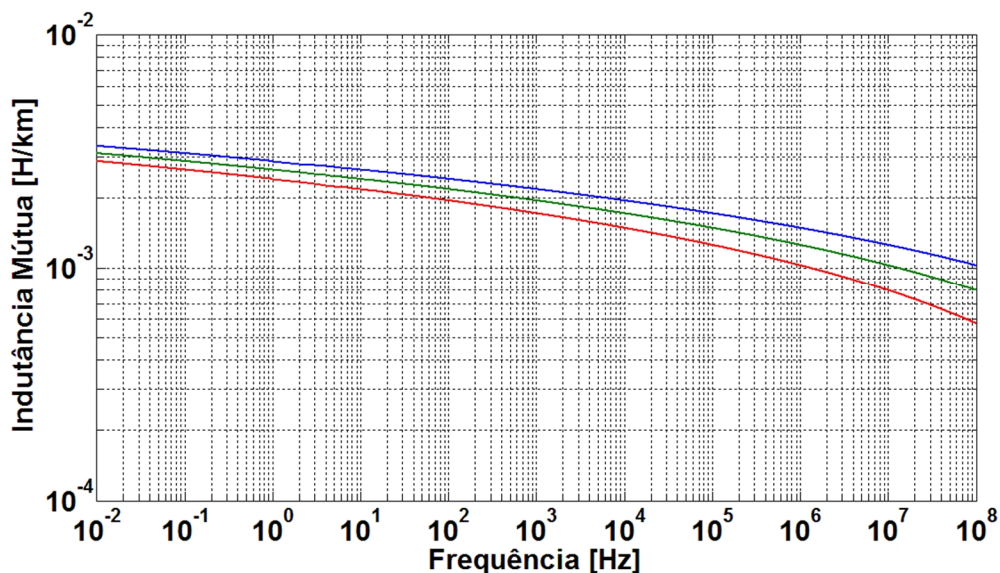


Figura 4.31. Indutância mútua fases mais afastadas (linha convencional) em função da resistividade do solo: Curva vermelha (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva azul (10 k $\Omega.m$).

A Figura 4.32 mostra a variação da indutância mútua para a linha não-convencional referente as fases afastadas.

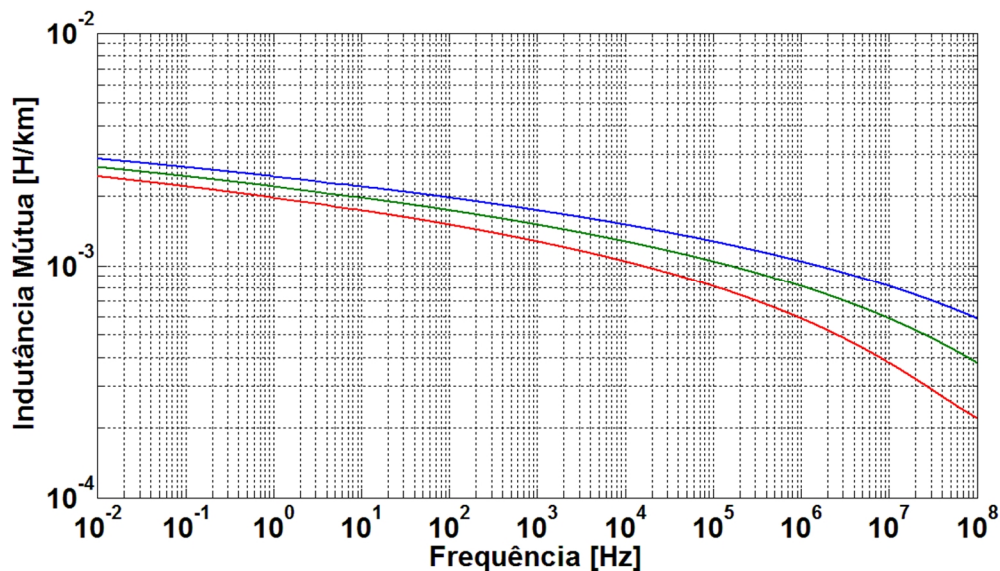


Figura 4.32. Indutância mútua fases mais afastadas (linha não-convencional) em função da resistividade do solo: Curva vermelha (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva azul (10 k $\Omega.m$).

Pela observação das figuras 4.31 e 4.32, pode-se notar o mesmo padrão de comportamento das figuras 4.28 e 4.29. Diferindo somente pelo fato de que para as fases mais afastadas as indutâncias apresentam valores mais baixos quando comparados com os das fases mais próximas.

Seguindo o mesmo procedimento já realizado para confecção da Figura 4.30. Foi feito o gráfico da Figura 4.33, que representa a relação entre as indutâncias da linha convencional sobre a não-convencional.

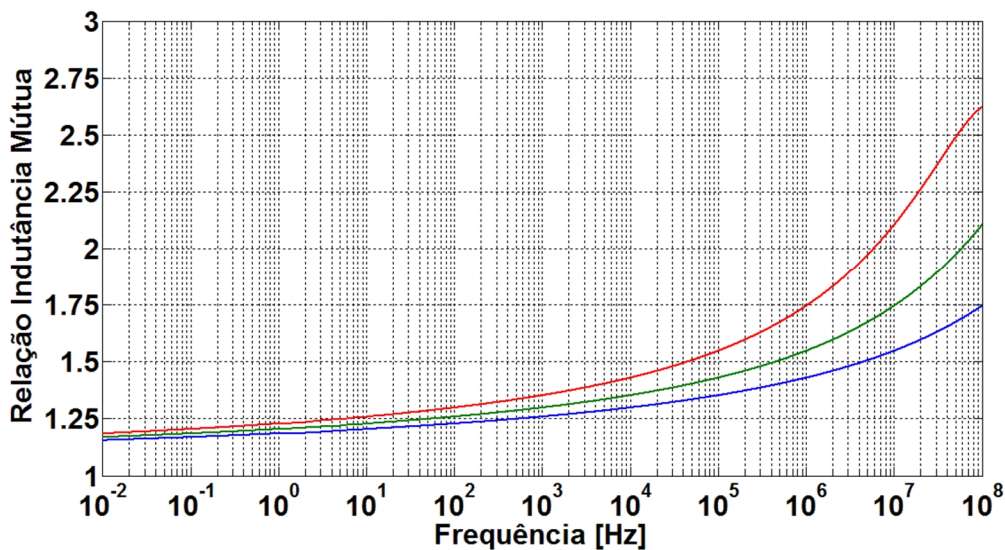


Figura 4.33. Relação entre as indutâncias mútuas mais afastadas linha convencional e não-convencional: Curva vermelha (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva azul (10 k $\Omega.m$).

Pode-se dizer aqui, que a influência da altura da torre é um pouco amenizada pela distância entre os condutores de uma mesma linha. Uma vez que para essas fases a porcentagem ficou em torno de 90%, na comparação entre as configurações de torres analisadas.

A seguir apresenta-se os gráficos de como varia a indutância com relação a resistividade do solo. Considerando para isso a frequência de 60 Hz e o mesmo polinômio de 8ª ordem usado para a confecção da Figura 4.15.

A Figura 4.34 apresenta a variação para a indutância mútua com relação às fases consecutivas.

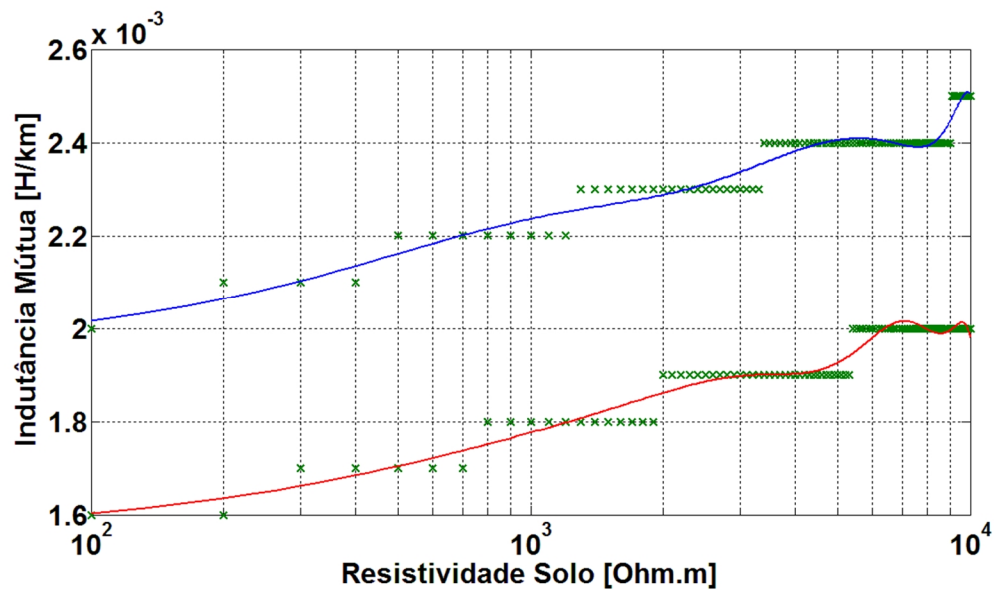


Figura 4.34. Variação da indutância mútua fases consecutivas a 60 Hz em função da resistividade do solo: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Já a Figura 4.35 apresenta a indutância com relação a resistividade do solo para as fases mais afastadas.

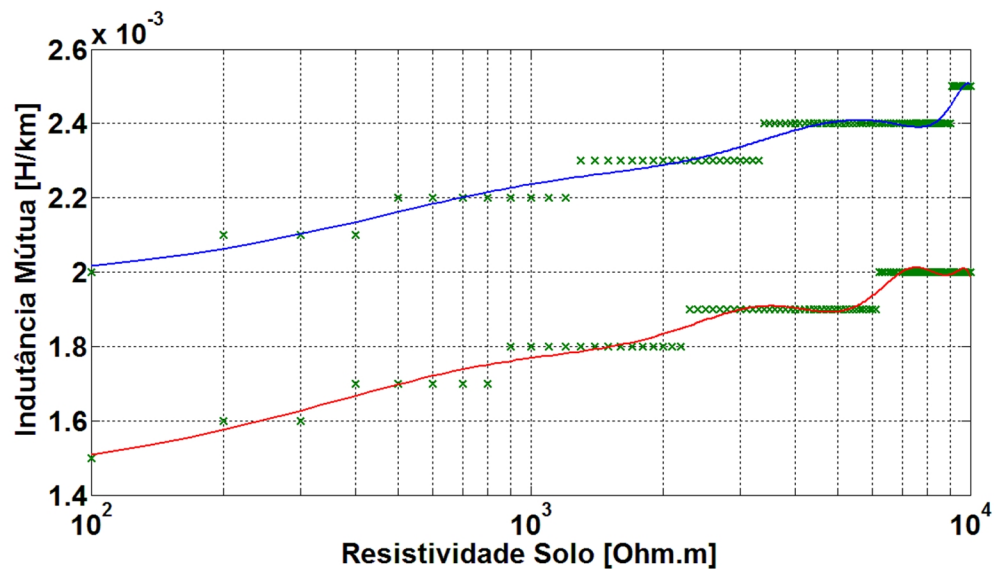


Figura 4.35. Variação da indutância mútua fases afastadas a 60 Hz em função da resistividade do solo: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Com o aumento da altura e da distância entre fases, uma vez que a distância horizontal e vertical das fases difere para as duas configurações, pode-se notar que a indutância para a configuração não-convencional possui uma pequena diferença, sendo maior a indutância mútua refere-se as fases mais próximas quando comparadas com a indutância das fases mais afastadas.

4.4 Parâmetros Transversais

Nessa etapa é apresentado o parâmetro que compõe a admitância transversal da linha de transmissão, a capacitância.

Para o estudo apresentado não são consideradas as condutâncias, pois para as linhas aéreas as perdas nos dielétricos são muito pequenas, podendo ser desconsideradas. Somente são analisadas aqui as capacitâncias transversais tanto próprias quanto mútuas.

Os resultados são apresentados a seguir na forma matricial para a linha convencional e não-convencional. Sendo que a disposição dos elementos da matriz de capacitância estão representados conforme mostrado a seguir:

$$[C] = \begin{bmatrix} b & bc & ba \\ cb & c & ca \\ ab & ac & a \end{bmatrix} \eta F/km \quad (4.1)$$

A disposição dos elementos da matriz de capacitância para o presente estudo tem a forma da equação 4.1, por se tratar de uma linha de transmissão com distribuição simétrica dos condutores das fases nas duas linhas estudadas, em que os termos da diagonal principal da matriz representam os elementos próprios e os elementos fora da diagonal os termos mútuos. Sendo designados conforme as letras de cada fase dada na equação 4.1.

Primeiramente apresenta-se a matriz de capacitâncias para a linha convencional na equação 4.2. Seguida da representação da matriz para a linha não-convencional, equação 4.3.

$$[C] = \begin{bmatrix} 13.65 & -3.49 & -3.49 \\ -3.49 & 13.37 & -1.11 \\ -3.49 & -1.11 & 13.37 \end{bmatrix} \eta F/km \quad (4.2)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 9.87 & -2.69 & -2.69 \\ -2.69 & 10.19 & -2.97 \\ -2.69 & -2.97 & 10.19 \end{bmatrix} \eta F/km \quad (4.3)$$

Analisando os valores das capacitâncias calculadas, nota-se que a magnitude dessas na fase B da linha convencional é 38,3% maior do que a configuração não-convencional.

Pela observação das equações presentes no capítulo 3, pode-se notar a dependência da matriz com coeficientes de potencial elétrico 3.63 com relação à altura dos condutores e como essa matriz se relaciona com a matriz de capacitâncias 3.67. Sendo a altura das fases fator de influência também para os parâmetros transversais de uma linha de transmissão, conforme se pode observar nas matrizes 4.2 e 4.3.

4.5 Parâmetros Longitudinais e Transversais em Seqüência de Fase

Nesse item são apresentados os parâmetros elétricos em seqüência positiva e zero para as duas configurações de linhas analisadas.

Para as simulações foi usado o software ATP (*Alternative Transient Program*) para obtenção dos dados dos modos de propagação das linhas.

A Figura 4.36 apresenta a mudança do valor de magnitude da resistência de seqüência positiva em função da freqüência para a linha convencional, representada pela curva em azul e não-convencional representada pela curva em vermelho.

A seguir para mostrar de forma mais clara como as diferenças se mostram para todo o espectro de freqüência. Foi traçado a curva da Figura 4.37, que representa como a resistência da linha convencional é maior que a da linha não-convencional.

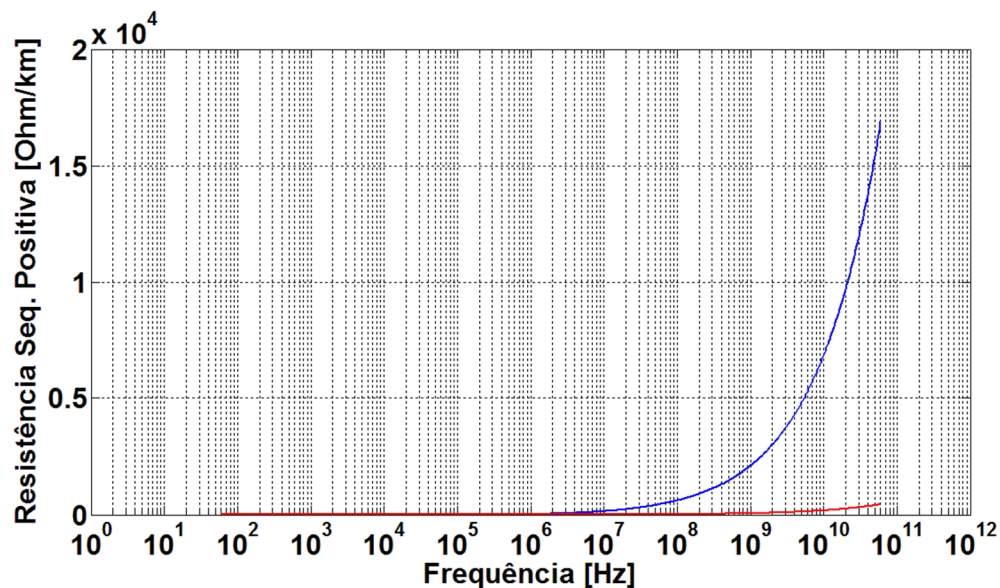


Figura 4.36. Resistência de seqüência positiva: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva vermelha).

Nota-se pela disposição das curvas que a linha convencional apresenta uma variação considerável a partir de 10 MHz. Já a curva em vermelho apresenta uma característica de crescimento menos acentuada.

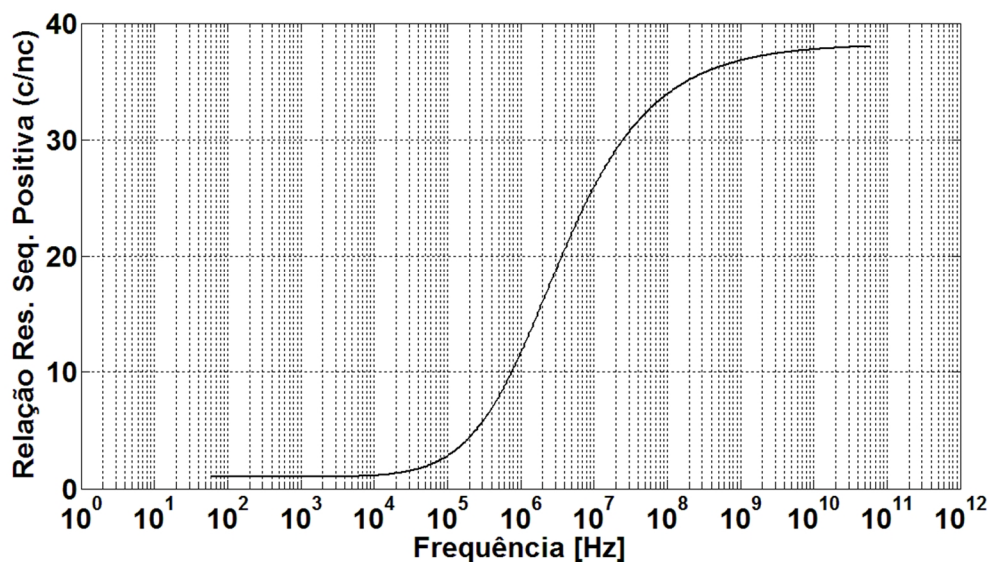


Figura 4.37. Relação resistências de seqüência positiva. Linha convencional sobre linha não-convencional.

Pela análise do gráfico pode-se perceber que para frequências baixas as duas resistências de seqüência positiva tendem a ser iguais. Porém com o aumento da frequência há uma tendência de crescimento da resistência para a configuração convencional. Chegando a ser 15 vezes maior que o outro arranjo para frequências em torno de 1 MHz.

O mesmo procedimento foi realizado para o levantamento das curvas de resistência de seqüência zero. Pois é um modo de importância quando analisado para situações de curto-circuito. A Figura 4.38 representa as curvas de seqüência zero, mantendo-se o mesmo esquema de cores da Figura 4.37.

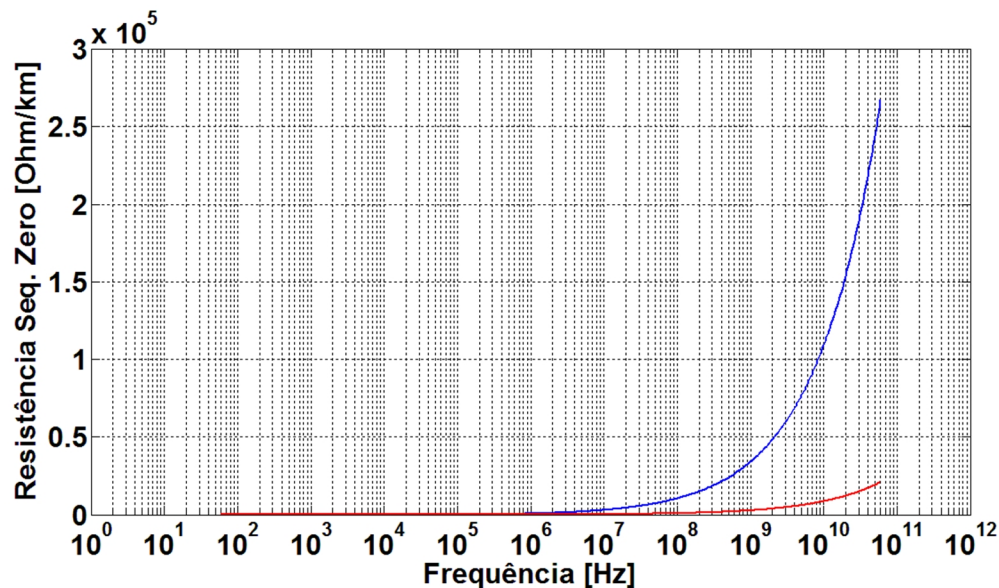


Figura 4.38. Resistência de seqüência zero: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva vermelha).

Pela observação das curvas percebe-se que o crescimento da resistência para esse modo, da linha convencional, é bem mais acentuado quando comparado com a de seqüência positiva, atingindo um valor de pico superior ao anterior.

A relação entre as resistências de seqüência zero é apresentada na Figura 4.39, novamente para mostrar o quão maior é esse parâmetro quando comparado as duas configurações de torres.

Em seguida a apresentação das resistências nos modos, passa-se para a apresentação das indutâncias para esses mesmos modos de propagação. A Figura 4.40 traz a variação da indutância

de seqüência positiva para a linha convencional (curva em azul) e não-convencional (curva em vermelho).

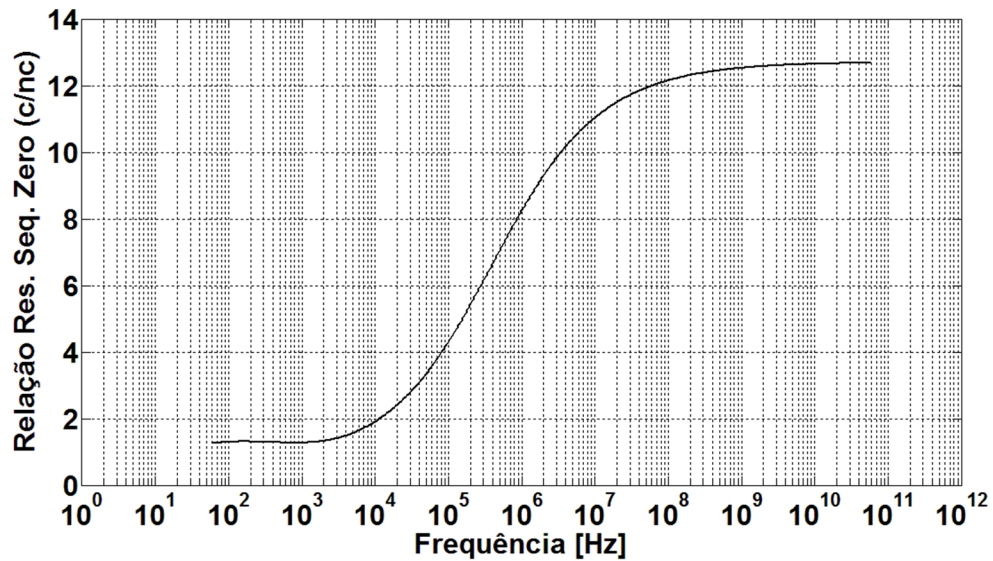


Figura 4.39. Relação resistências de seqüência zero. Linha convencional sobre linha não-convencional.

O que pode ser observado da Figura 4.39 é um alto crescimento da resistência para o arranjo convencional frente ao não-convencional. Chegando a ser 8 vezes maior para frequências em torno de 1 MHz.

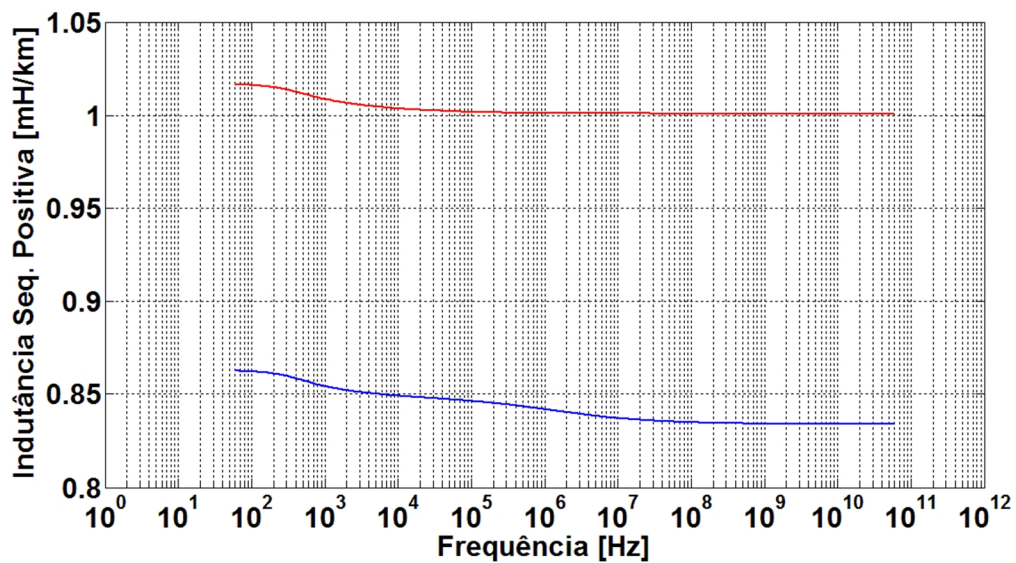


Figura 4.40. Indutância de seqüência positiva: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva vermelha).

Pela Figura 4.40 pode-se notar que a indutância apresentada para a configuração não-convencional possui valores mais altos para as mesmas frequências quando comparada com a outra linha.

Para uma melhor visualização dos resultados foi traçado a relação entre as indutâncias a fim de se mostrar a variação. A Figura 4.41 traz o resultado da razão entre as duas indutâncias.

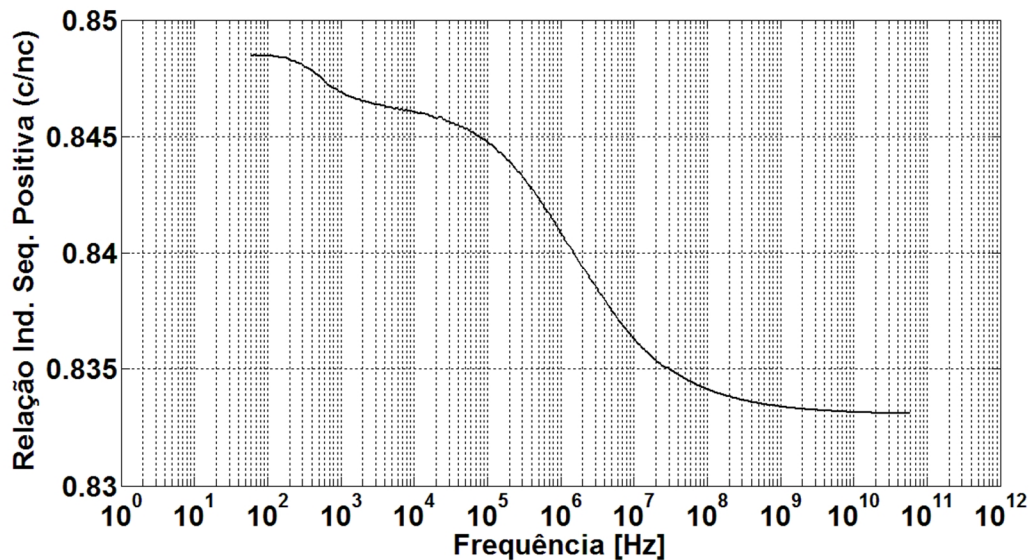


Figura 4.41. Relação indutância de sequência positiva. Linha convencional sobre Linha não-convencional.

A diferença entre as indutâncias permanece quase constante para todo o espectro de frequência analisado, sendo cerca de 13% na comparação entre linhas.

A seguir apresenta-se na Figura 4.42 a indutância de sequência zero para as configurações das duas linhas analisadas. Pode-se notar que para frequências próximas a 60 Hz, as indutâncias das duas linhas apresentam valores próximos. Com o aumento da frequência percebe-se um afastamento dos valores de indutância. Apresentando a linha não-convencional um valor maior quando comparado com a linha convencional.

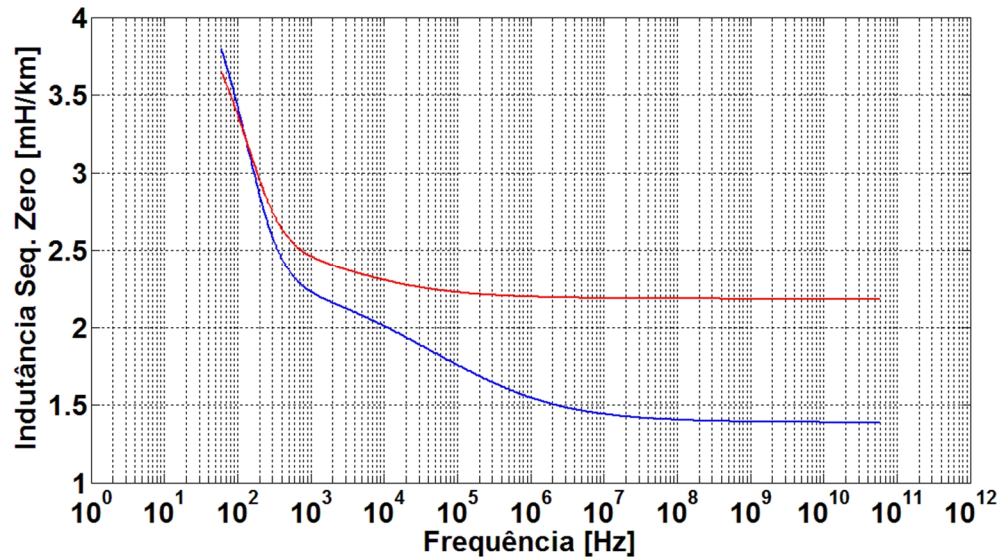


Figura 4.42. Indutância de seqüência zero: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva vermelha).

Para se observar a diferença entre as indutâncias, traçou-se o gráfico da Figura 4.43, que representa a razão para os dois modelos de linha de transmissão.

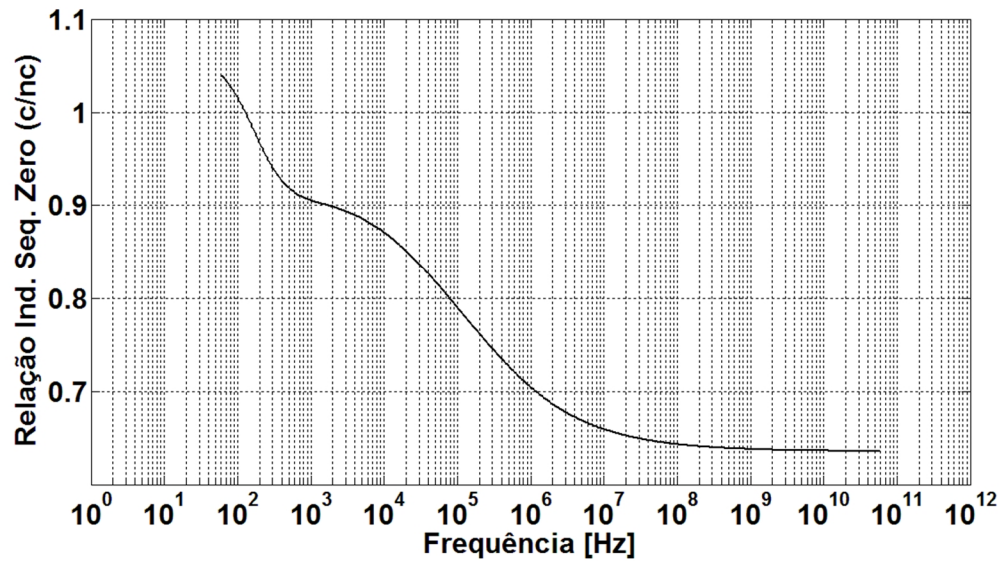


Figura 4.43. Relação indutância de seqüência zero. Linha convencional sobre Linha não-convencional.

Pela Figura 4.43 pode-se perceber que nas frequências em torno de 1 MHz a indutância da linha convencional pode ser 30% menor que a da linha não-convencional.

4.6 Análise das Características de Propagação [2]

Sabe-se que a característica de propagação das ondas de corrente e tensão em uma linha de transmissão é governada pela função de propagação γ . Para uma linha de transmissão real, levando-se em conta todos os parâmetros, γ é dado pela equação:

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} \quad (4.4)$$

Elevando ambos os membros ao quadrado e separando as partes reais e imaginárias, obtém-se:

$$\alpha = \text{Re}\{\gamma\} = \sqrt{\frac{(rg - \omega^2 LC) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)}}{2}} \quad (4.5)$$

$$\beta = \text{Im}\{\gamma\} = \sqrt{\frac{(\omega^2 LC - rg) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)}}{2}} \quad (4.6)$$

Portanto uma onda senoidal aplicada nas equações gerais da linha, tanto de corrente como de tensão, sofre a influência da função de propagação γ . Uma vez que a mesma serve como argumento das funções hiperbólicas.

Então, as ondas propagantes presentes pela linha de transmissão sofrem um amortecimento provocado por α e um avanço β na fase.

Em virtude disso, α recebe o nome de função de atenuação, tendo por unidade o [néper/km] ou o [Db/km]. Dela dependem os módulos das tensões ou correntes. Seu valor é diretamente relacionado com as perdas de energia nas linhas.

Já a parte imaginária, β , dada em [radianos/km], recebe o nome de função de fase, pois indica a forma como as fases da tensão e da corrente variam ao longo da linha.

Outra análise importante a ser citada é a do termo correspondente a impedância característica da linha. Representado pela seguinte relação:

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{(r+j\omega L)}{(g+j\omega C)}} \quad (4.7)$$

Verifica-se pela análise de (4.7) que Z_C não depende do comprimento da linha, somente do meio em que esta se encontra e de suas dimensões físicas, distância entre os condutores e raio dos condutores. Sendo constante para cada linha e, por isso mesmo, é considerada uma grandeza característica denominada impedância natural da linha.

A Figura 4.44 apresenta a variação da função de propagação em função da frequência para as duas linhas de transmissão.

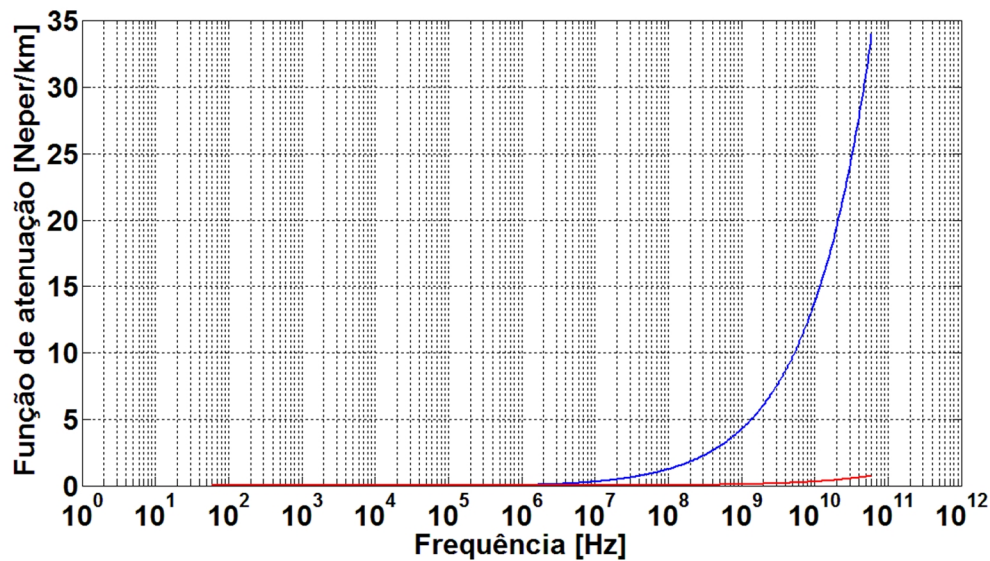


Figura 4.44. Função de atenuação (α) de seqüência positiva: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva vermelha).

Nota-se um crescimento de α com o aumento da frequência para a linha convencional, indicando maiores atenuações das ondas propagantes para frequências elevadas.

A relação entre as funções de atenuação para as duas configurações foi colocada no gráfico da Figura 4.45, para se ter uma idéia quantitativa da diferença anteriormente observada.

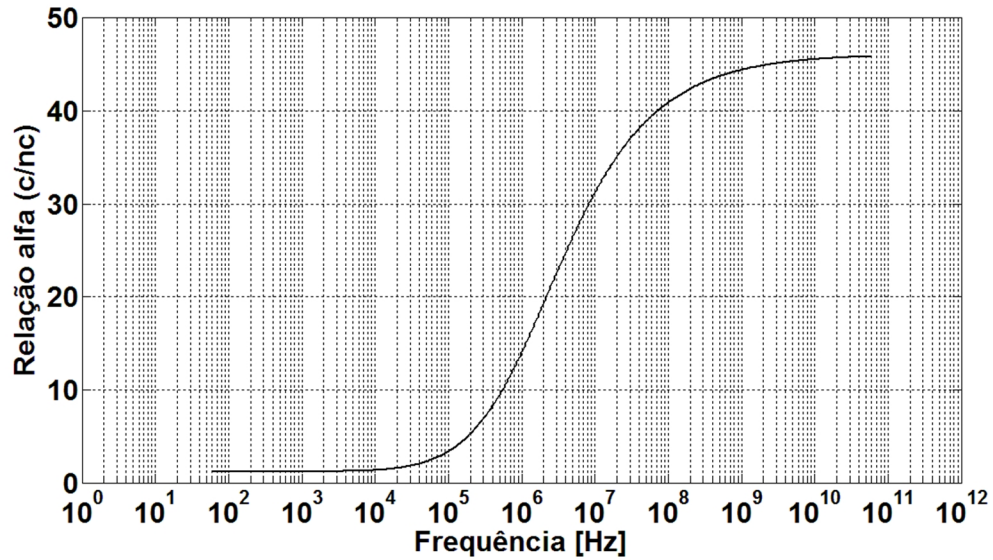


Figura 4.45. Relação entre as funções de atenuação (α) de seqüência positiva para as duas linhas.

A Figura 4.45 mostra a relação da função de atenuação para as configurações das linhas. Nota-se que a linha convencional, para o regime permanente, apresenta maior dissipação de ondas propagantes. Para frequências em torno 1 MHz a relação chega a mais de 20 vezes.

A Figura 4.46 mostra a mesma variação da função de atenuação das duas linhas para a seqüência zero. Pode-se notar que a função de atenuação de seqüência zero é cerca de 10 vezes maior quando comparada com a de seqüência positiva.

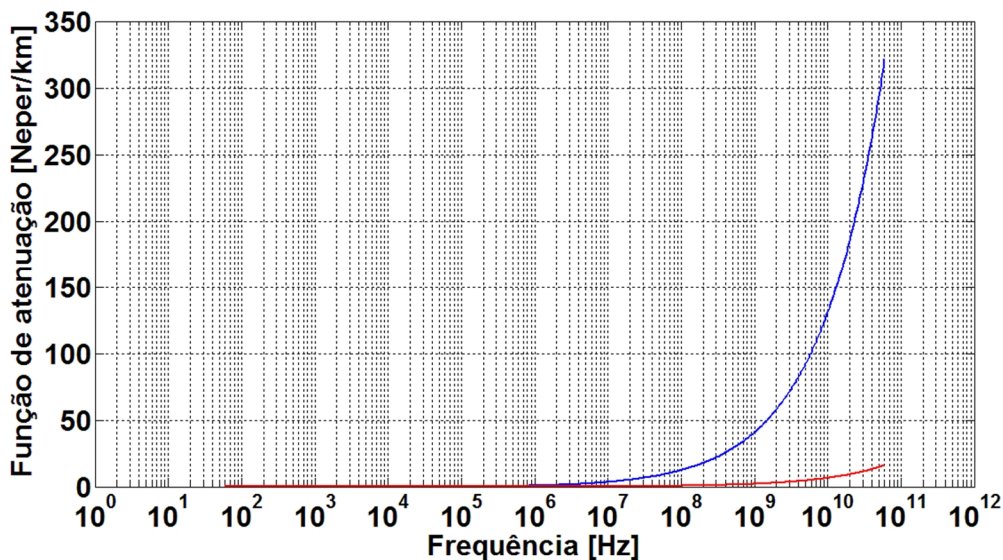


Figura 4.46. Função de atenuação (α) de seqüência zero: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva vermelha).

A Figura 4.47 mostra quantitativamente a diferença existente dos valores da função de atenuação para as duas configurações de linhas.

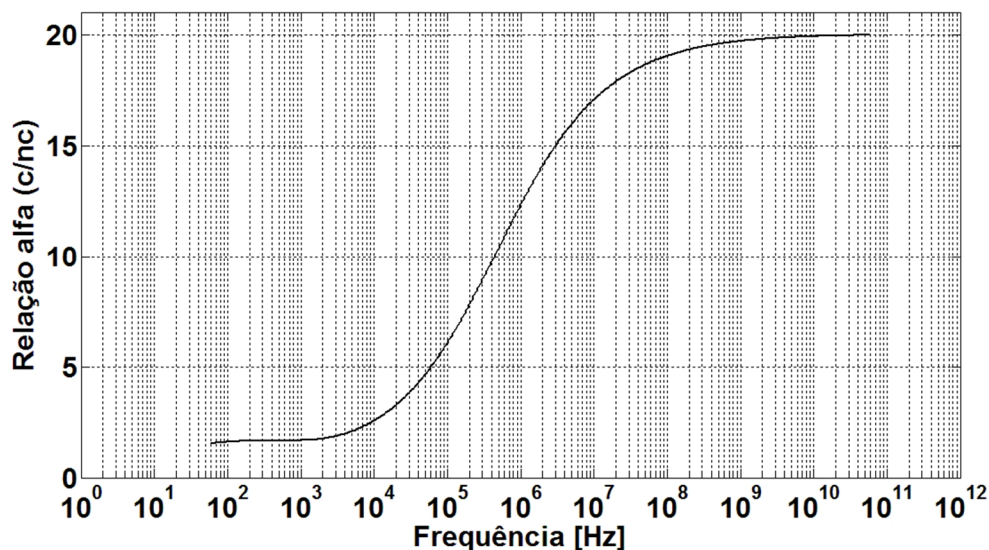


Figura 4.47. Relação entre as funções de atenuação (α) de seqüência zero para as duas linhas.

Nota-se o mesmo perfil de comportamento da função de propagação para o modo de seqüência positiva. Entretanto, apresenta valores um pouco menores quanto à magnitude, apresentando, a linha convencional, para frequências em torno de 1 MHz valores 12 vezes maiores que a linha não-convencional.

Esse fato indica que pode haver uma menor atenuação das sobrecorrentes e sobretensões de curto-circuito para a linha não-convencional.

Outro fator analisado foi a função de propagação de seqüência positiva, apresentada na Figura 4.48. Tal função é importante para estudos de distorções nas ondas propagantes.

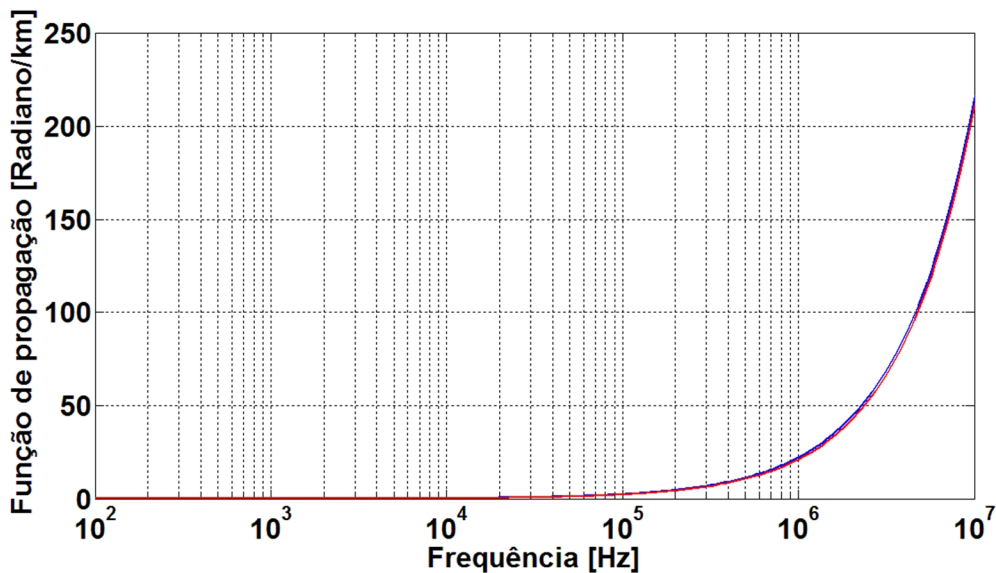


Figura 4.48. Função de propagação (β) de seqüência positiva: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva vermelha).

Observa-se que para esse termo não há grande diferença entre os modelos de linha convencional e não-convencional.

A razão entre as funções de propagação para as duas configurações é mostrada na Figura 4.49. Onde se pode confirmar o comportamento observado na Figura 4.48.

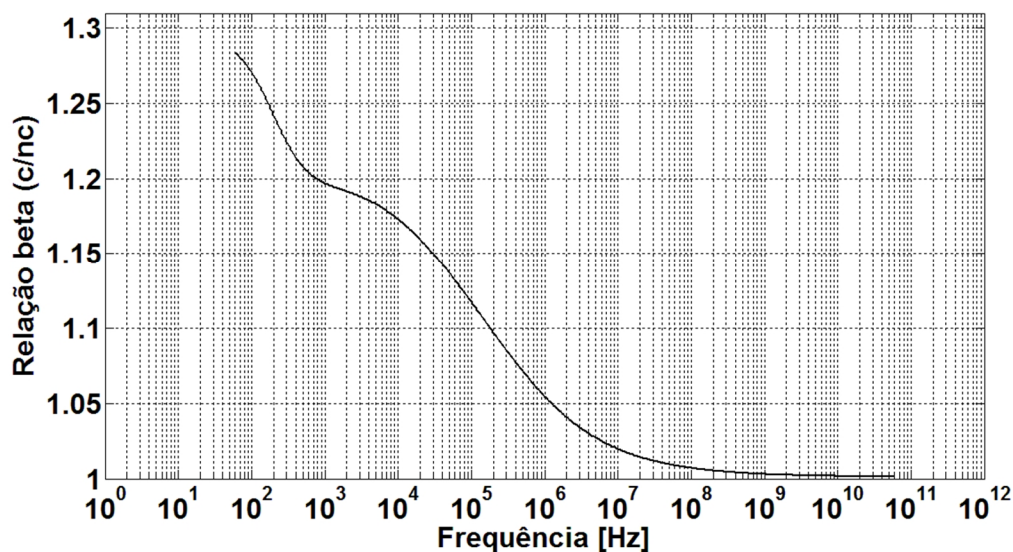


Figura 4.49. Relação entre as funções de propagação (β) de seqüência positiva para as duas linhas.

A função de propagação para o modo de seqüência zero vem apresentada em seguida na Figura 4.50.

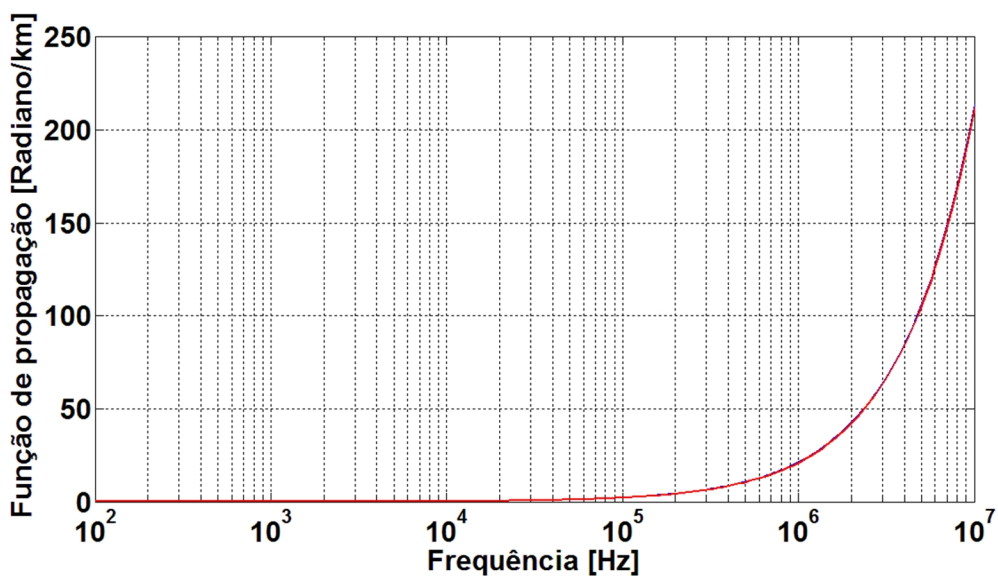


Figura 4.50. Função de propagação (β) de seqüência zero: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva vermelha).

Pode-se observar que para esse modo de propagação a função de propagação (β) apresenta a mesma característica de crescimento para os dois modelos de linha.

A razão entre as duas funções é apresentada na Figura 4.51 a fim de se observar quantitativamente a diferença.

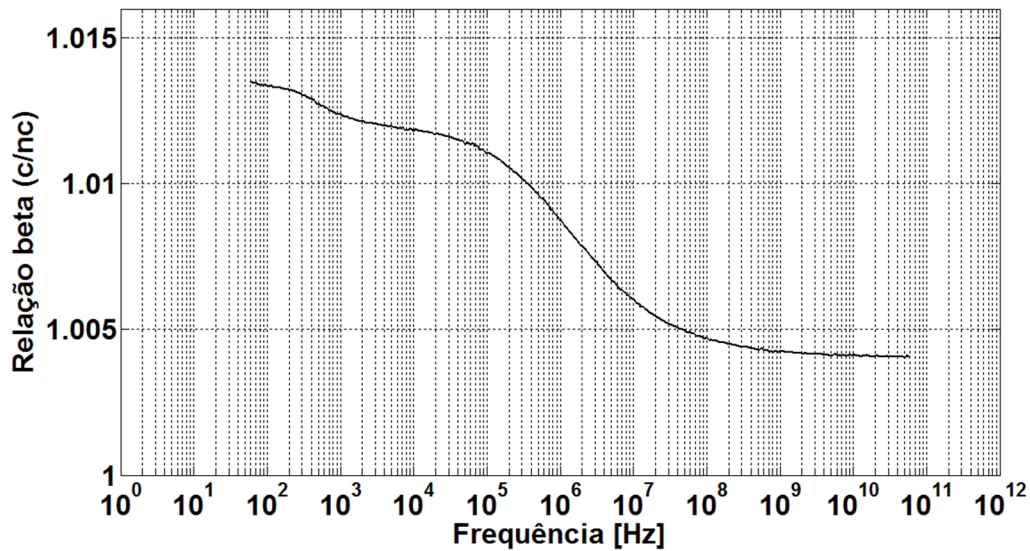


Figura 4.51. Relação entre as funções de propagação (β) de sequência zero para as duas linhas.

A seguir, na Figura 4.52 está representado o módulo da impedância característica para o modo de propagação em sequência positiva para as duas configurações de linha.

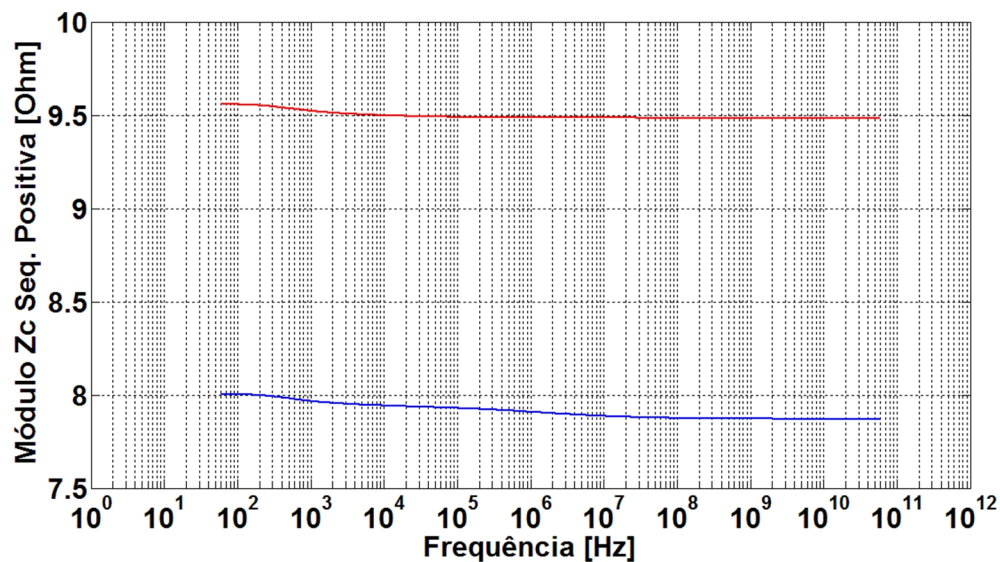


Figura 4.52. Módulo Z_c sequência positiva: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva vermelha).

Nota-se que o módulo da impedância característica de seqüência positiva da linha convencional é menor que a da não-convencional, para o espectro de freqüências analisado.

Outro fato observado é que o módulo da impedância da linha convencional apresenta uma ligeira queda com a freqüência. Fato que não é observado para a linha não-convencional.

A fim de se mostrar mais claramente essa diferença foi traçado o gráfico da Figura 4.53 que mostra a razão das duas grandezas.

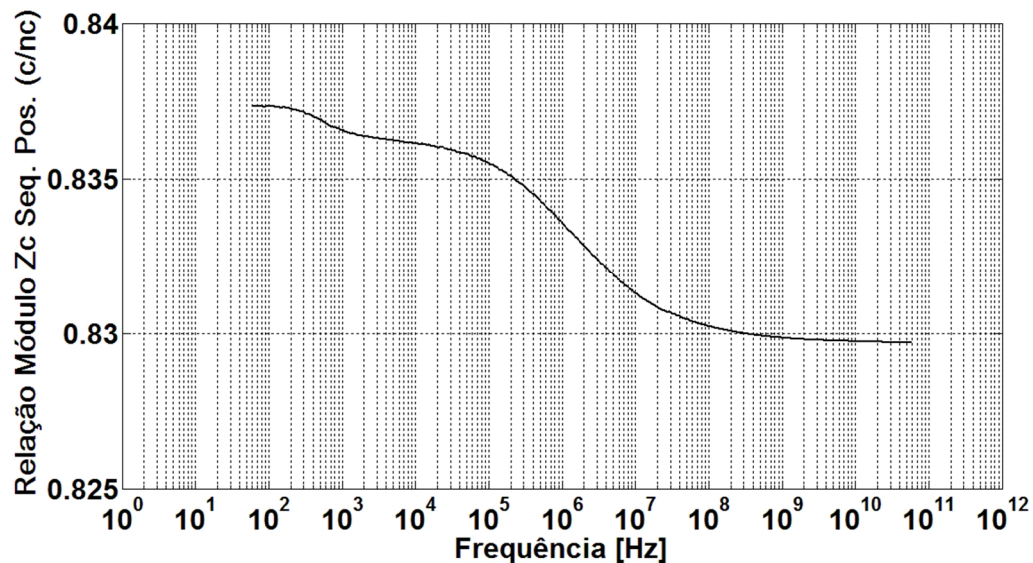


Figura 4.53. Relação módulo Z_c seqüência positiva para as duas linhas.

Pela observação da Figura 4.53 pode-se concluir que a diferença fica em torno dos 15% para todo o espectro de freqüência.

Partindo para a mesma análise em seqüência de fase zero. Foi traçado o gráfico do módulo da impedância característica, mostrado na Figura 4.54.

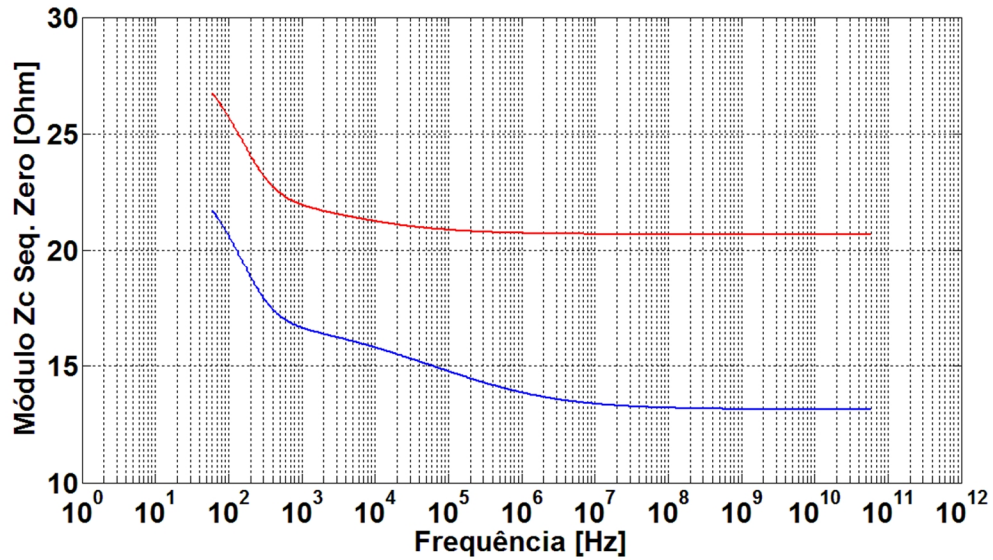


Figura 4.54. Módulo Z_c seqüência zero: Linha convencional (curva azul) e linha não-convencional (curva vermelha).

Na Figura 4.54 pode-se ver que o módulo da impedância é maior para a configuração não-convencional. Sendo que a diferença entre elas aumenta com o aumento da frequência até um limite onde os dois módulos permanecem constantes.

Para mostrar de forma mais clara foi traçado a relação entre as magnitudes na Figura 4.55.

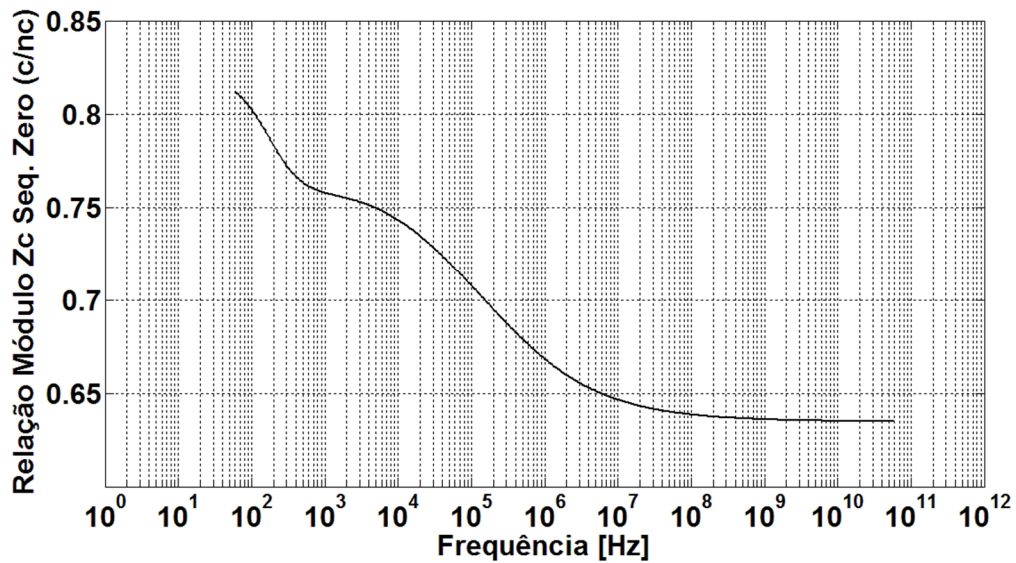


Figura 4.55. Relação módulo Z_c seqüência zero para as duas linhas.

Nota-se aqui uma tendência de diminuição da diferença até a frequência de 1 MHz. Após tal frequência a diferença entre os módulos da impedância tende a ficar perto dos 35%. Sendo que para todo o espectro de frequência analisado o módulo da impedância da linha não-convencional se mostrou maior.

4.7 Conclusão

Foi visto nessa etapa o desempenho dos parâmetros elétricos das duas configurações de linha de transmissão frente a variação de frequência. Os resultados do cálculo dos parâmetros elétricos dessas linhas mostraram a influência da altura na composição da indutância e resistência. Apresentando a linha não-convencional uma resistência e indutância menor.

Outro resultado obtido é com respeito da influência da variação da resistividade do solo na composição dos parâmetros. Foi observado uma maior influência desse fator na linha não-convencional, em que para solos com baixa resistividade fazem os parâmetros dessa linha serem também mais baixos.

As diferenças observadas nos parâmetros elétricos nas fases foram analisadas em componentes simétricas a fim de se observar como varia a função de propagação, a resistência, indutância e impedância característica nos modos desacoplados.

Os resultados mostraram uma tendência da torre não-convencional estar sujeita a sobretensões e sobrecorrentes mais elevadas que a linha convencional. Uma vez que apresenta valores mais baixos de atenuação, além da maior altura que torna essa linha mais suscetível a descargas atmosféricas.

Capítulo 5 Comportamento de Linhas de Transmissão Convencional e Não-Convencional no Domínio do Tempo

5.1 Introdução

Nesse capítulo as linhas de transmissão convencional e não-convencional são analisadas no domínio do tempo tanto para o sinal de entrada em forma de degrau, obtendo-se assim a resposta em transitórios lentos, quanto para o sinal em forma de dupla exponencial a fim de se obter a resposta do sistema de transitórios mais rápidos. O sinal de entrada está representado na Figura 5.1 pela fonte $U(t)$ com magnitude de 1 pu para as duas formas de ondas aplicadas.

Foram observadas para tanto os sinais com o receptor em aberto, para se analisar o comportamento das reflexões de tensão no fim e início da linha de transmissão, sendo esse o pior caso de estudo para as sobretensões. E com o receptor da linha em curto-circuito tem-se o comportamento das correntes através dos condutores das fases, podendo-se medir suas magnitudes e reflexões.

Os esquemas dos testes aplicados são mostrados na Figura 5.1. Em (a) pode-se observar a fonte $U(t)$ aplicada a fase B e as duas outras fases do sistema aterradas na entrada da linha. O fim da linha está em aberto e na presença de três medidores de tensão representados por V na figura. Em (b) tem-se a mesma configuração vista em (a) para o início da linha. Porém com o fim da linha tendo as três fases curto-circuitadas para terra e a presença de três medidores de corrente representados pela letra A.

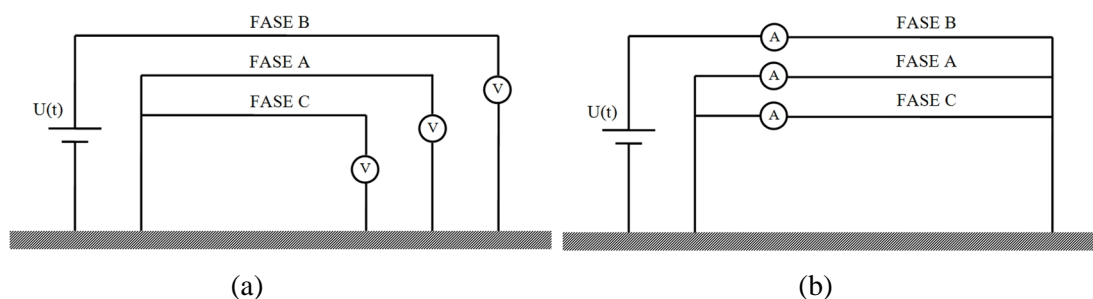


Figura 5.1. Representação dos circuitos para os testes realizados nas linhas de transmissão.

Por fim a variação da resistividade do solo é novamente estudada, para que se possa estabelecer como a diferença desse fator influencia, no domínio do tempo, o desempenho das duas configurações de linhas analisadas nesse trabalho.

Para as simulações utilizou-se o software ATP (*Alternative Transient Program*) e o módulo integrado LINE CONSTANTS, onde foram colocados os dados de entrada das linhas (geometria, tipo de cabo, etc.). O modelo utilizado para as simulações foi o JMarti, esta opção pode ser usada para a obtenção de um modelo de linha de transmissão com os seus parâmetros variando com a frequência, adequado para estudos de transitórios. Com isso foi possível a obtenção dos resultados no domínio do tempo das linhas analisadas.

5.2 Análises para Sinal Degrau

A primeira análise realizada, para a observação do comportamento das configurações de linha, foi a injeção de um sinal em forma de degrau na entrada do sistema a fim de se obter a resposta para a simulação de um chaveamento e os transitórios ocasionados por esse fenômeno, para resistividades do solo de 100 $\Omega.m$, 1000 $\Omega.m$ e 10000 $\Omega.m$.

Os testes em aberto e em curto-circuito foram divididos nos subitens mostrados abaixo. Começando pela apresentação dos resultados com o fim da linha de transmissão em aberto.

5.2.1 Receptor em Aberto

A Figura 5.2 mostra o comportamento do sinal de tensão na saída da linha para a resistividade do solo de 100 $\Omega.m$. Com a curva em vermelho representando a configuração não-convencional e a curva em azul a linha convencional.

A Figura 5.3 mostra a tensão induzida no receptor em uma das fases em que não se aplica o sinal de tensão.

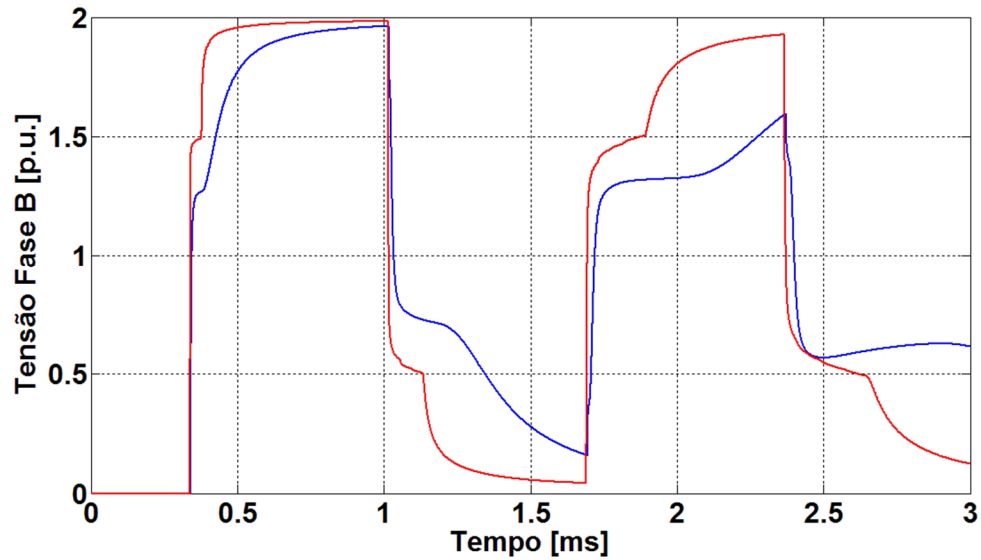


Figura 5.2. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de $100 \Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Observa-se que logo para primeira reflexão a tensão tende a dobrar o seu valor com o receptor em aberto. A configuração não-convencional apresenta uma taxa de subida mais elevada se comparado com a linha convencional. Além de apresentar uma menor atenuação para as reflexões seguintes.

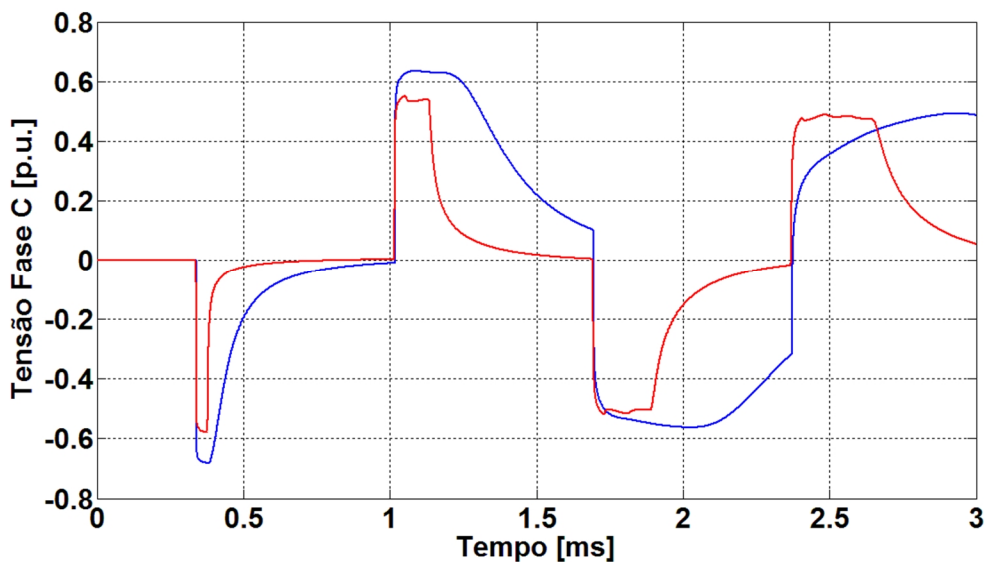


Figura 5.3. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de $100 \Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Da Figura 5.3, nota-se que a configuração não-convencional apresenta uma queda mais acentuada quando comparada com a convencional. Possui também, magnitude inferior pelo maior distanciamento das fases na configuração da torre. Fazendo com que a influência dos termos mútuos para essa configuração seja menor.

A Figura 5.4 mostra as curvas da tensão no receptor para a resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$.

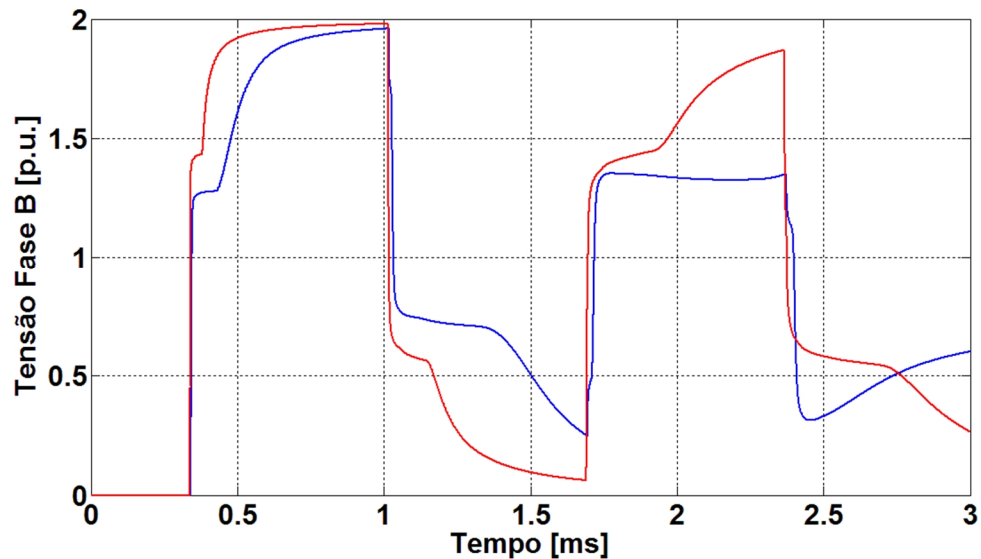


Figura 5.4. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Observa-se que a tensão da configuração convencional (azul) apresenta uma maior atenuação a cada nova reflexão quando comparada com o perfil da onda da Figura 5.2. O mesmo tipo de fenômeno pode ser observado para a linha não-convencional, que apresenta uma taxa de crescimento de tensão mais lenta em comparação com a onda da Figura 5.2.

A Figura 5.5 representa a tensão induzida em uma das fases não energizadas. Com a curva em vermelho sendo a configuração não-convencional e a azul a convencional.

A Figura 5.6 mostra a tensão aplicada a uma das fases para a resistividade do solo de 10000 $\Omega.m$. Em que a curva em vermelho representa a linha não-convencional e a curva em azul a configuração convencional.

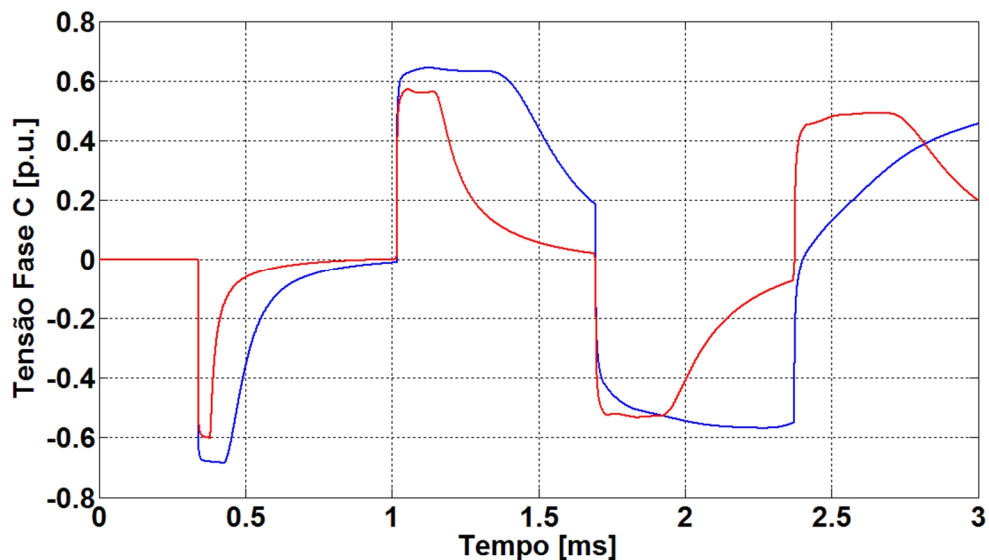


Figura 5.5. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Com relação a tensão induzida, o resultado mostrado na Figura 5.3 é observado para a resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$ (figura 5.5). Apresentando as tensões induzidas, para as duas configurações, uma queda menos acentuada e uma maior permanência. Quando comparadas com as apresentadas para a resistividade do solo de 100 $\Omega.m$.

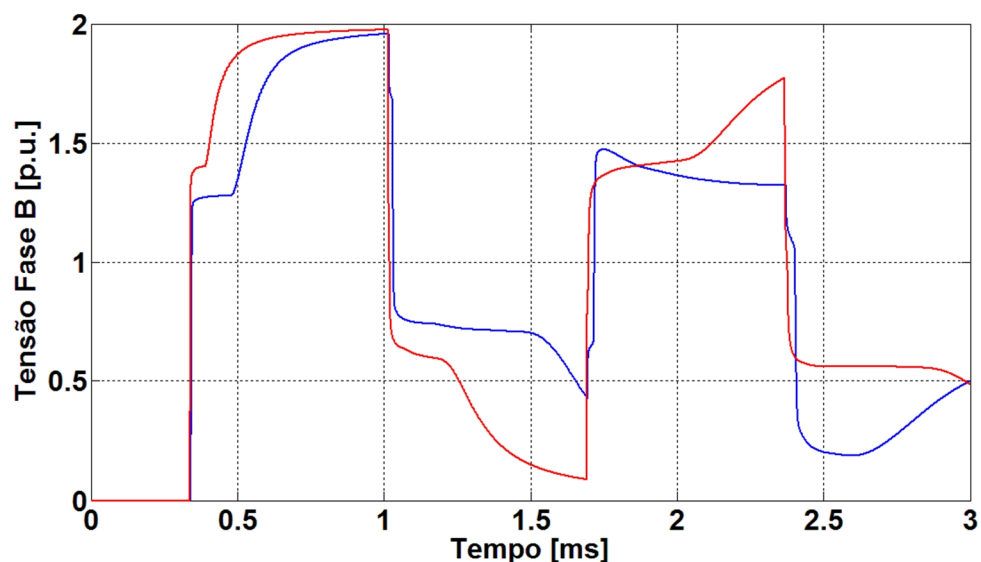


Figura 5.6. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 10000 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Observa-se a tendência do aumento da resistividade do solo diminuir a taxa de crescimento da tensão, para as duas configurações. Fato que pode ser notado pelas curvas apresentadas na Figura 5.6.

A Figura 5.7 mostra a tensão induzida em uma das fases não energizadas para as duas configurações. Considerando a resistividade do solo de 10000 $\Omega.m$.

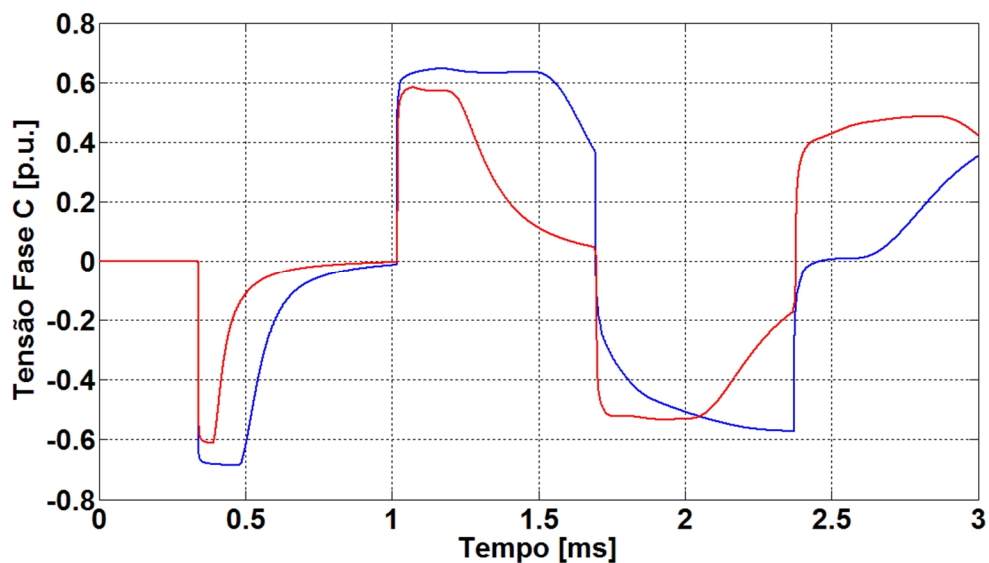


Figura 5.7. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 10000 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Observa-se na Figura 5.7 a tendência da manutenção dos fenômenos apresentados para as resistividades do solo anteriormente colocadas. As tensões induzidas apresentam quedas menos acentuadas nos valores de magnitude e maior permanência do sinal. Fato que pode ser explicado pelas menores correntes de retorno pelo solo devido ao aumento da resistividade do solo.

Como última análise realizada, para o fim da linha em aberto, foram colocadas juntas as curvas das resistividades do solo para as duas configurações. Primeiramente, na Figura 5.8, tem-se a composição de linha convencional para a fase energizada.

A Figura 5.9 mostra a mesma representação da figura 5.8, para a fase não energizada. Mostrando como a tensão induzida varia de acordo com a resistividade do solo em que se encontra.

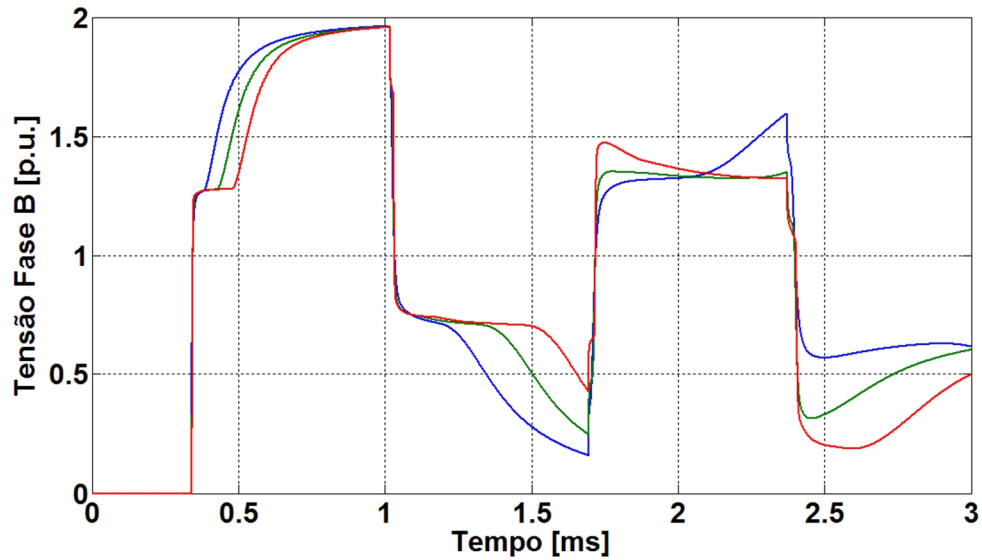


Figura 5.8. Tensão na saída da linha convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelho (10000 $\Omega.m$).

Pela observação da Figura 5.8 nota-se como o aumento da resistividade do solo tende a diminuir a taxa de crescimento da tensão medida no final da linha de transmissão. Porém, para a primeira reflexão, não muda a magnitude do pico da onda de tensão.

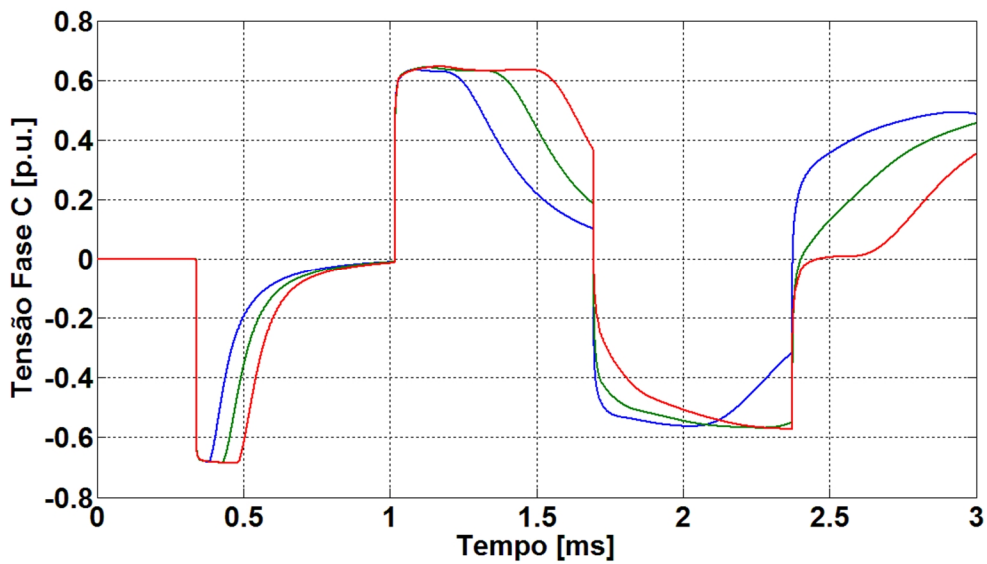


Figura 5.9. Tensão na saída da linha convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

A observação da Figura 5.9 permite verificar que, para maiores resistividades de solo, a tensão induzida nas fases não energizadas tende a permanecer por um período de tempo maior do que o apresentado para menores resistividades do solo. Fato esse, que pode ser explicado pela maior impedância que o solo apresenta para a corrente de retorno pelo terreno. Fazendo com que a tensão permaneça por um intervalo de tempo maior.

A Figura 5.10 apresenta as curvas realizadas para a configuração de torre não convencional, para as mesmas resistividades do solo anteriormente analisadas.

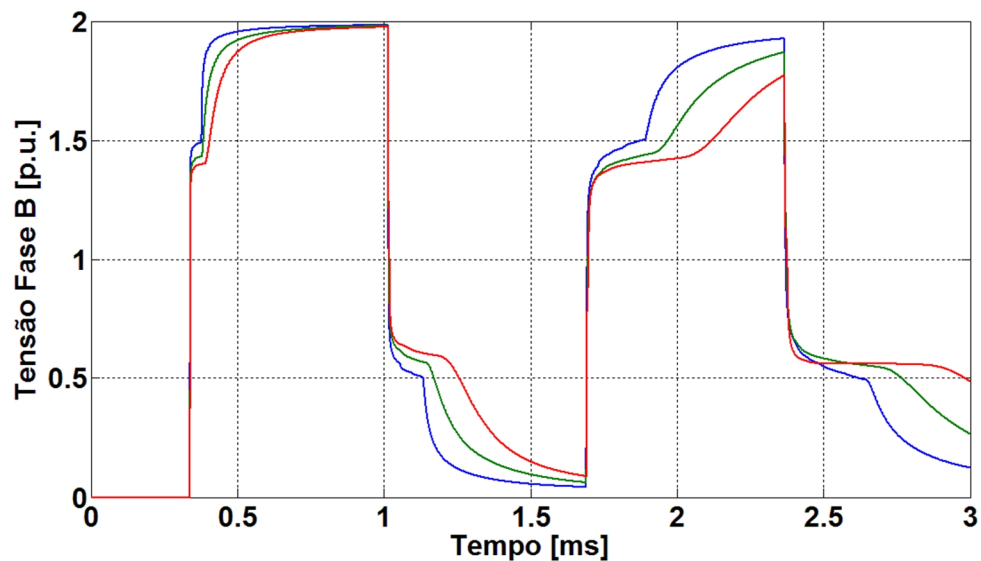


Figura 5.10. Tensão na saída da linha não-convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

O mesmo comportamento observado para a configuração de torre convencional é novamente repetido para a não-convencional, em que maiores resistividade do solo diminuem a taxa de crescimento do sinal de tensão no final da linha.

Em comparação com a Figura 5.8 as curvas da Figura 5.10, apresentam uma taxa de crescimento mais elevada, fazendo com que a configuração não-convencional esteja sujeita a sobretensões por um período de tempo mais longo.

Nota-se também que, as atenuações para as reflexões sucessivas são menores para essa configuração de torre. E um aumento da resistividade do solo faz crescer a atenuação das reflexões.

A Figura 5.11 mostra o comportamento de uma das fases não energizadas da configuração não-convencional.

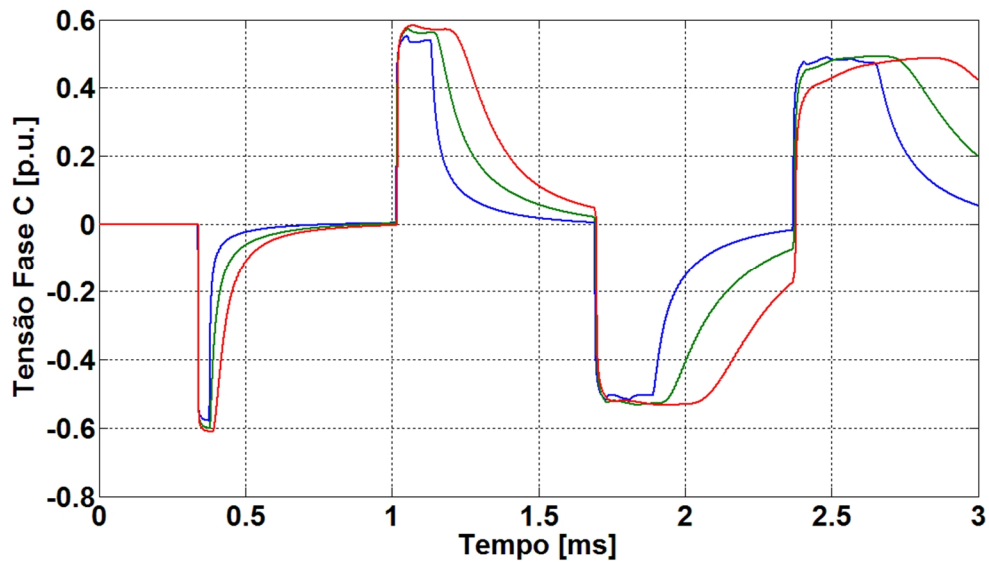


Figura 5.11. Tensão na saída da linha não-convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 Ω.m), curva verde (1000 Ω.m) e curva vermelha (10000 Ω.m).

Pode-se notar, novamente, a tendência da maior resistividade do solo aumentar a permanência da tensão induzida.

As curvas da Figura 5.11 possuem tempos de permanência das tensões induzidas menores que as vistas na Figura 5.9. Fato causado pela maior distância entre as fases da linha não-convencional levando ao menor acoplamento das tensões entre fases.

5.2.2 Receptor em Curto-Circuito

Nesse ponto analisa-se o comportamento da linha de transmissão, para o mesmo sinal de entrada do teste anterior, agora com seu final em curto-circuito.

A Figura 5.12 mostra as curvas de corrente das duas representações de linha, sendo a curva azul a configuração convencional e a vermelha a não-convencional.

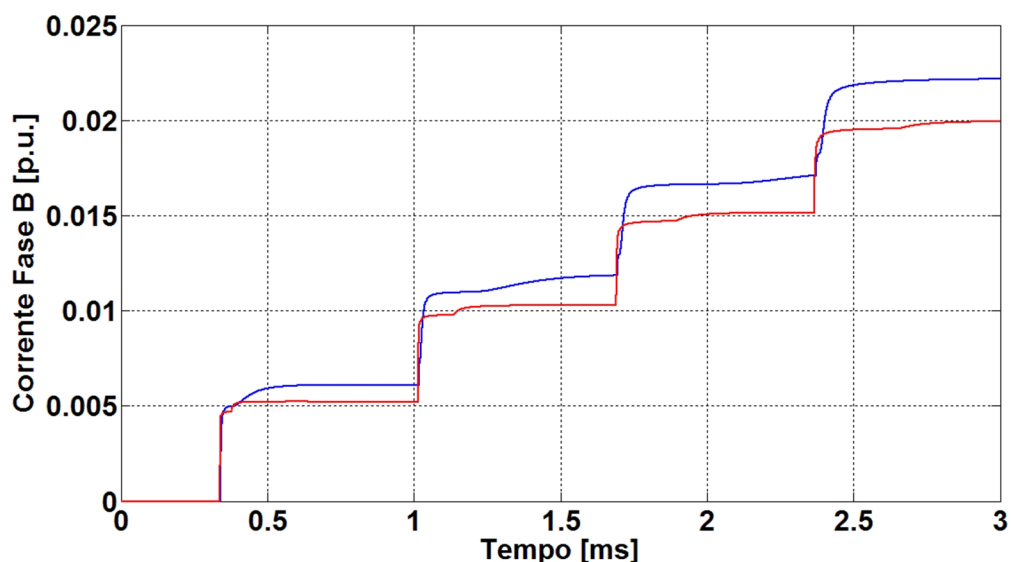


Figura 5.12. Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 100 Ω .m: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

A Figura 5.12 mostra que a corrente da configuração convencional apresenta níveis mais elevados quando comparada com a da linha não-convencional, tendendo a um aumento progressivo após cada reflexão.

A Figura 5.13 mostra o comportamento das correntes induzidas em uma das fases não energizadas.

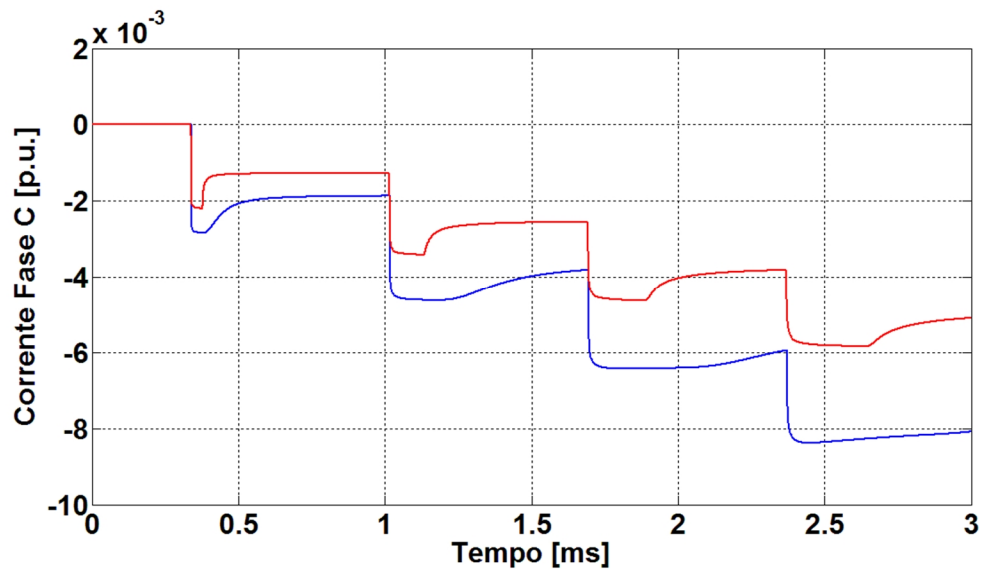


Figura 5.13. Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 100 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Novamente a curva que representa a linha convencional possui valores de magnitude superiores, na comparação com a configuração não-convencional, por apresentar fases mais próximas e por isso sujeitas a maior influência de acoplamentos mútuos.

A Figura 5.14 apresenta as curvas das duas configurações para a resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$ e mantendo-se as mesmas configurações de cores. Já a Figura 5.15 mostra as curvas das correntes induzidas.

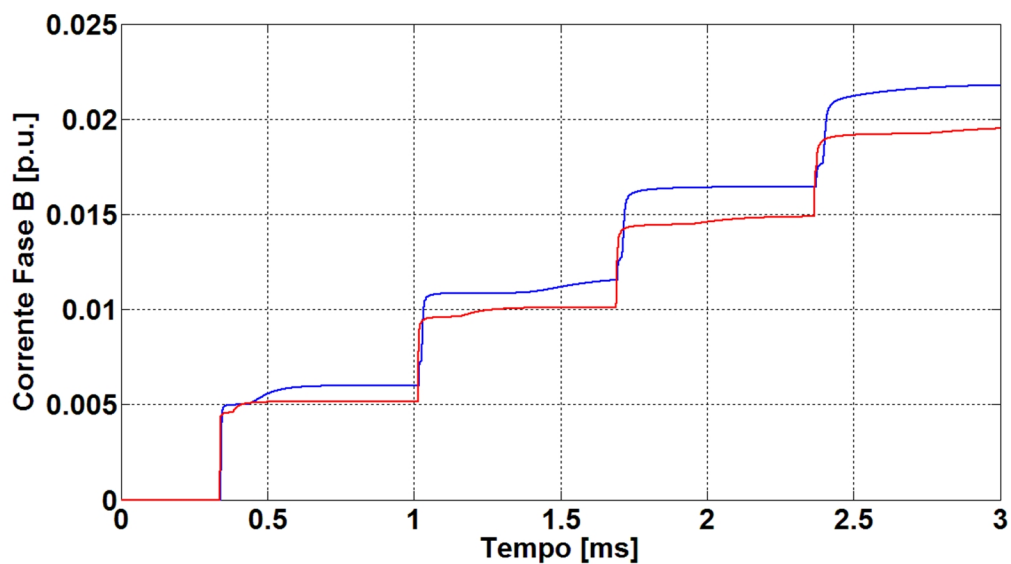


Figura 5.14. Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

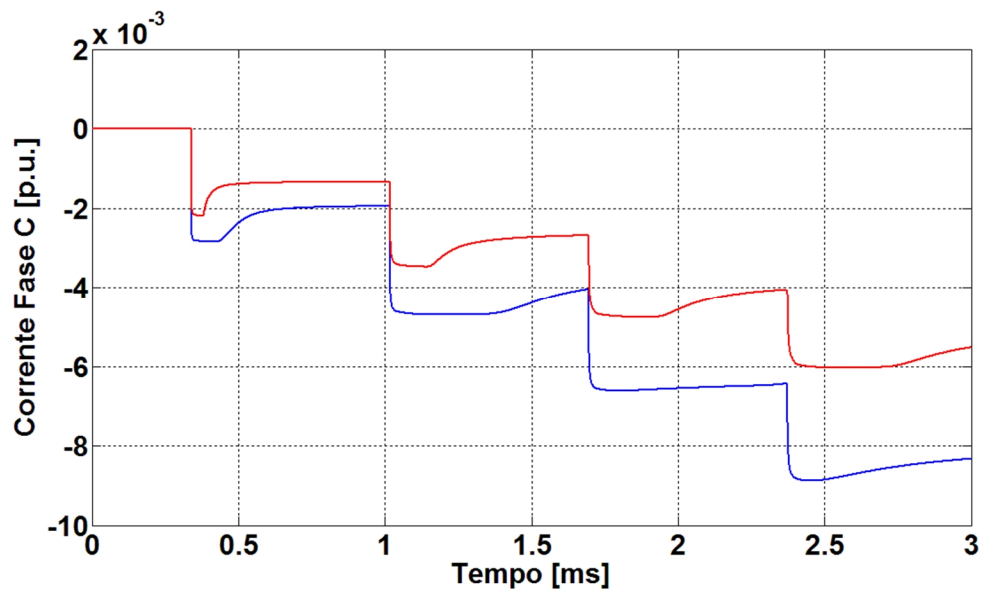


Figura 5.15. Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 1000 Ω .m: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Nota-se para as figuras 5.14 e 5.15 um comportamento semelhante ao apresentado nas figuras 5.12 e 5.13, apresentando diminuição das magnitudes das correntes para a fase em que foi aplicado o sinal de tensão, e um aumento nas correntes induzidas nas fases sem aplicação, para uma resistividade do solo de 1000 Ω .m,

As mesmas curvas foram traçadas para a resistividade do solo de 10000 Ω .m. A Figura 5.16 mostra a corrente na fase de aplicação do sinal e a Figura 5.17 mostra a corrente induzida em uma das fases não energizadas.

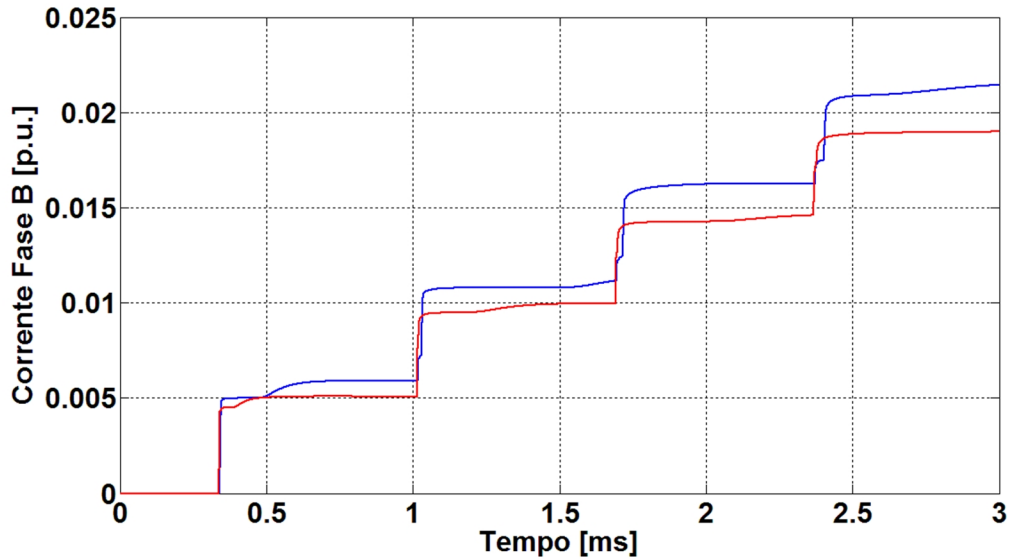


Figura 5.16. Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

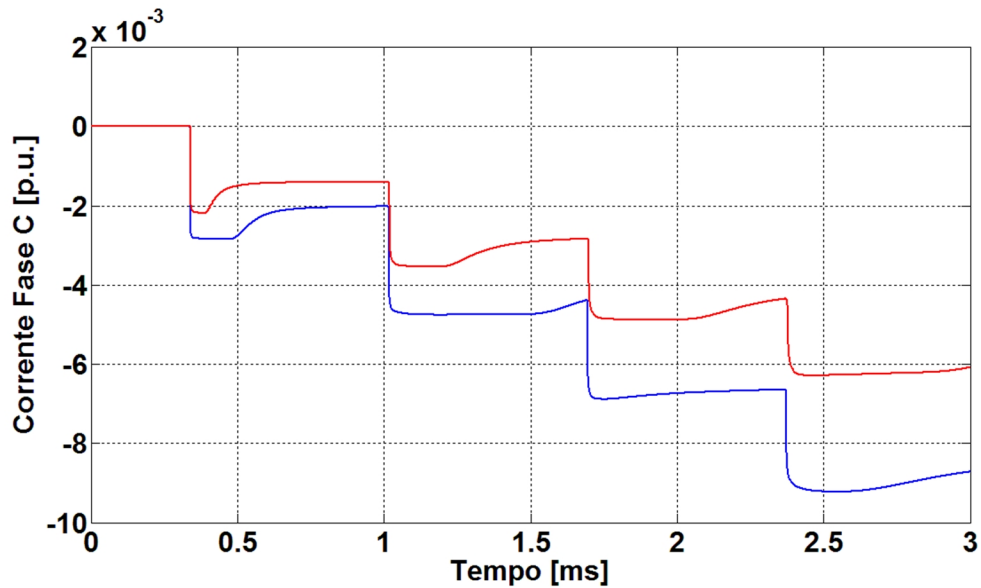


Figura 5.17. Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$: linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

O que se pode notar, das figuras 5.16 e 5.17, é a manutenção dos fenômenos anteriormente observados, em que há diminuição da corrente através da linha em que houve a aplicação do sinal de tensão e aumento das correntes induzidas nas fases vizinhas, com o aumento da resistividade do solo.

A próxima análise a ser realizada leva em consideração a variação da resistividade do solo para uma mesma representação de linha de transmissão. A Figura 5.18 mostra as curvas para as diferentes resistividades do solo da linha convencional

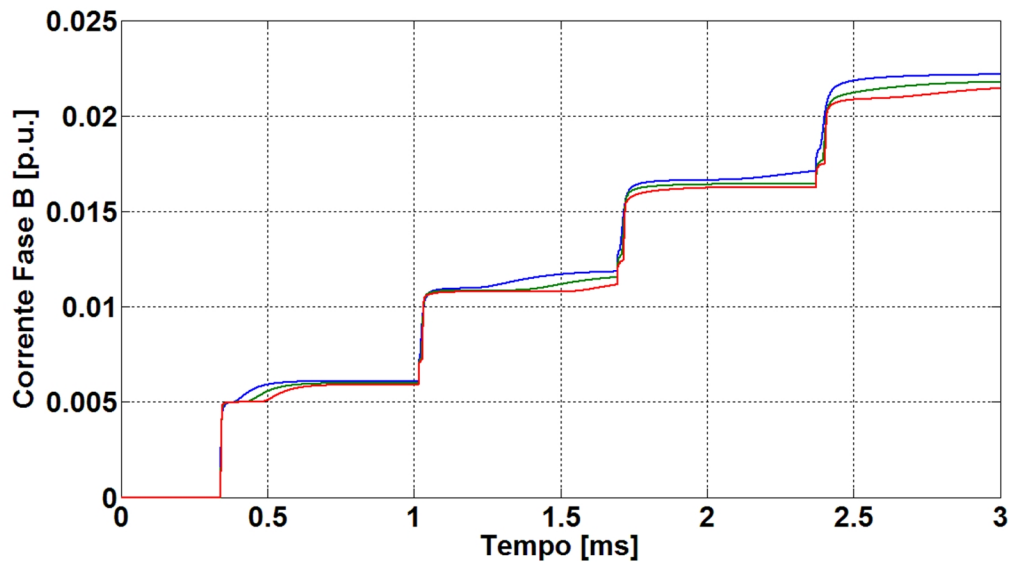


Figura 5.18. Corrente na saída da linha convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 Ω.m), curva verde (1000 Ω.m) e curva vermelha (10000 Ω.m).

Pela observação da Figura 5.18 pode-se notar que um aumento da resistividade do solo causa uma diminuição da corrente através da linha. Tornando-se mais evidente com o decorrer das reflexões.

A Figura 5.19 mostra a corrente induzida em uma das fases não energizadas para diferentes resistividades do solo.

A Figura 5.20 mostra as mesmas curvas para a configuração não-convencional, mantendo-se o mesmo esquema de cores anteriormente apresentado.

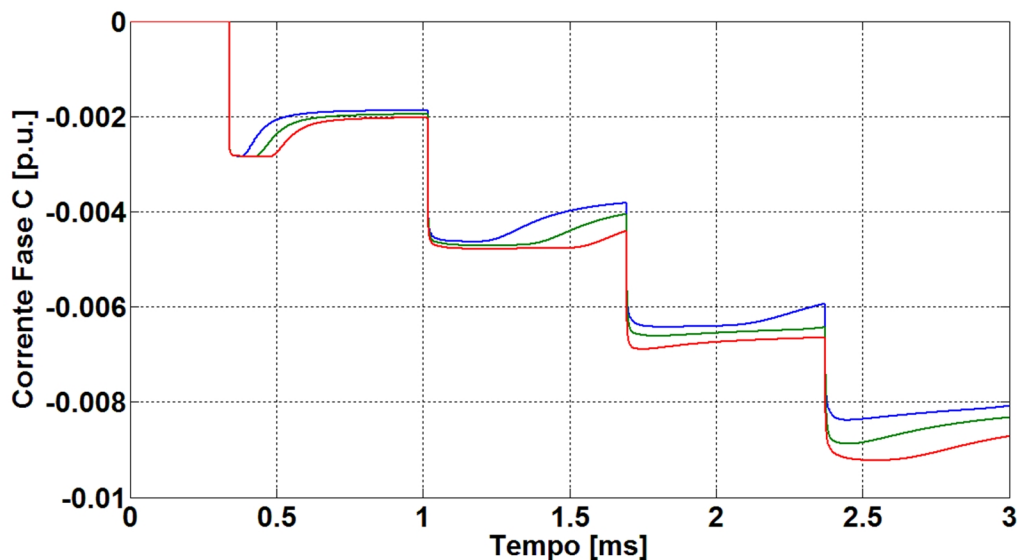


Figura 5.19. Corrente na saída da linha convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

Nota-se que para a corrente induzida o aumento da resistividade do solo causa um aumento na magnitude. Sendo também crescente a diferença com o decorrer do tempo. Fato que pode ser explicado pela menor corrente de retorno pelo solo, o que faz com que as correntes induzidas tenham maior magnitude.

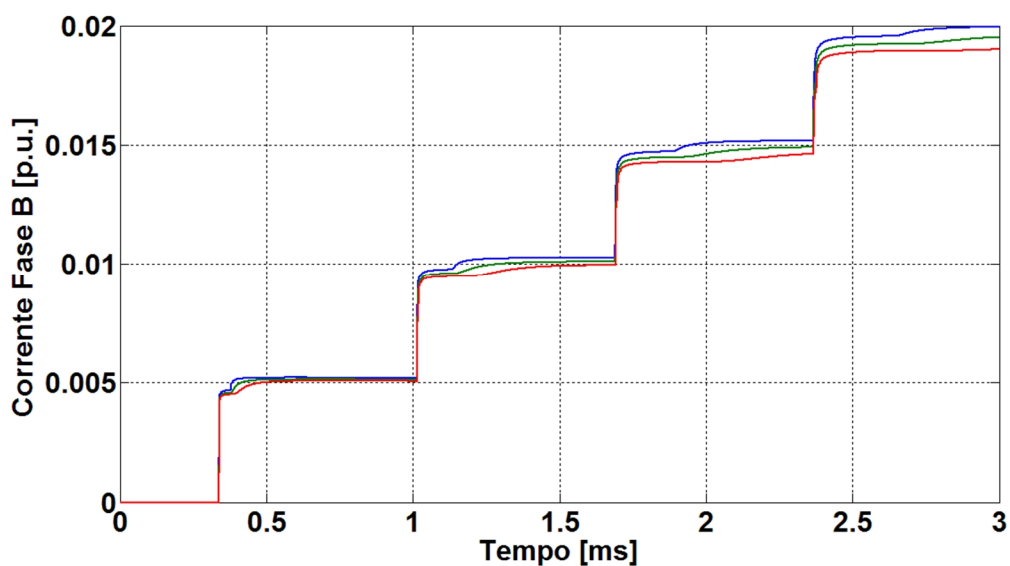


Figura 5.20. Corrente na saída da linha não-convencional para resistividades do solo de: Curva azul (v), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

Em comparação com a Figura 5.18 as curvas da Figura 5.20 apresentam menor magnitude da corrente através da linha. Nota-se também que para as primeiras reflexões, a linha não-convencional, quase não apresenta variação com relação a resistividade do solo. Tornando-se, a diferença, evidente no decorrer das reflexões.

Por fim a Figura 5.21 mostra as correntes induzidas em uma das fases não energizadas da configuração não-convencional.

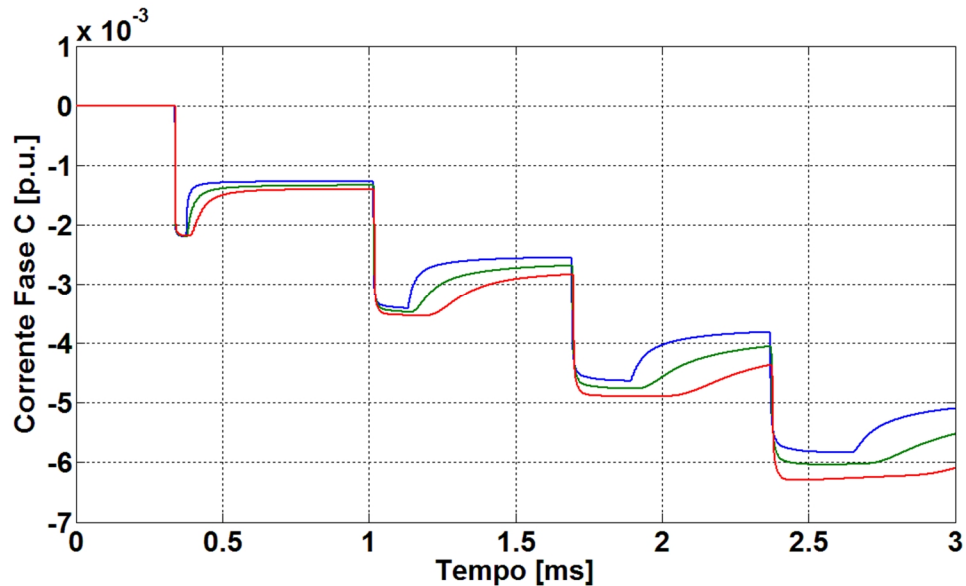


Figura 5.21. Corrente na saída da linha não-convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

Pode-se observar que as correntes induzidas para essa configuração são menores quando comparadas com as correntes induzidas da linha convencional. Outra característica observada na Figura 5.21 é a maior influência da resistividade do solo nas diferentes correntes induzidas.

5.3 Análise para Sinal de Entrada Exponencial

A seguinte análise a ser realizada, para a observação do comportamento transitório dos sinais, é a injeção de uma onda dupla exponencial 1.2/50 μs na entrada da linha, a fim de se obter

a resposta para transitórios rápidos, considerando as resistividades do solo de $100 \Omega.m$, $1000 \Omega.m$ e $10000 \Omega.m$.

Os testes em aberto e em curto-circuito foram divididos nos subitens mostrados abaixo. Começando pela apresentação dos resultados com o fim da linha de transmissão em aberto.

5.3.1 Receptor em Aberto

A Figura 5.22 representa o sinal de tensão medido no fim da linha, na fase de aplicação do sinal exponencial. Sendo a curva em azul a representação da configuração convencional e a em vermelho da não-convencional. Para a resistividade do solo de $100 \Omega.m$.

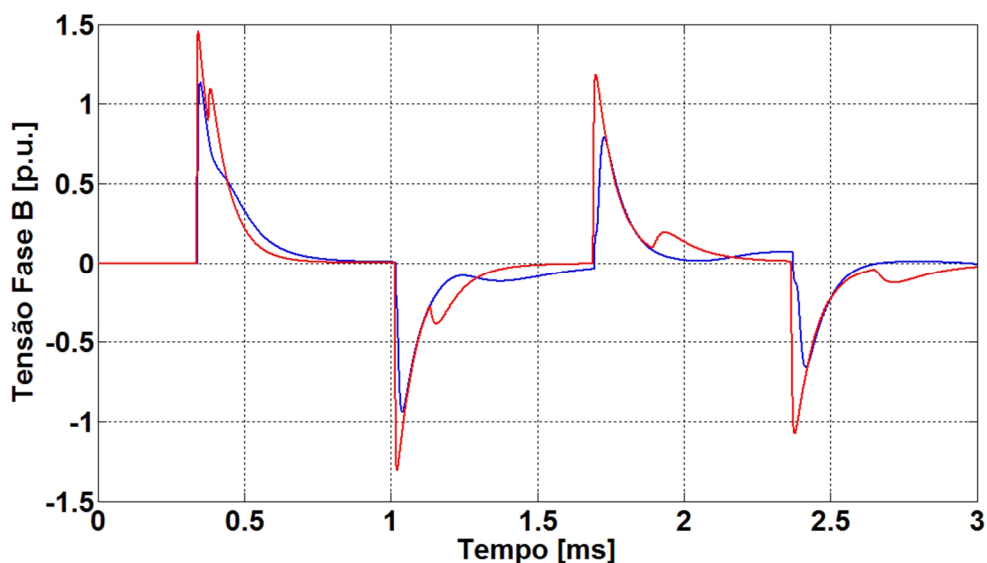


Figura 5.22. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de $100 \Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Nota-se que as duas configurações têm valores de tensão menores que no caso de aplicação do degrau. A configuração não-convencional apresenta picos de tensão mais elevados que a convencional. Apresentando também, menor atenuação nas reflexões sucessivas.

Com respeito ao tempo de permanência dos sinais medidos pode-se observar pela Figura 5.22 que os dois sinais tendem a seguir os mesmos tempos

A Figura 5.23 apresenta as tensões induzidas para uma das fases não energizadas. Assim como realizado para a aplicação do sinal degrau.

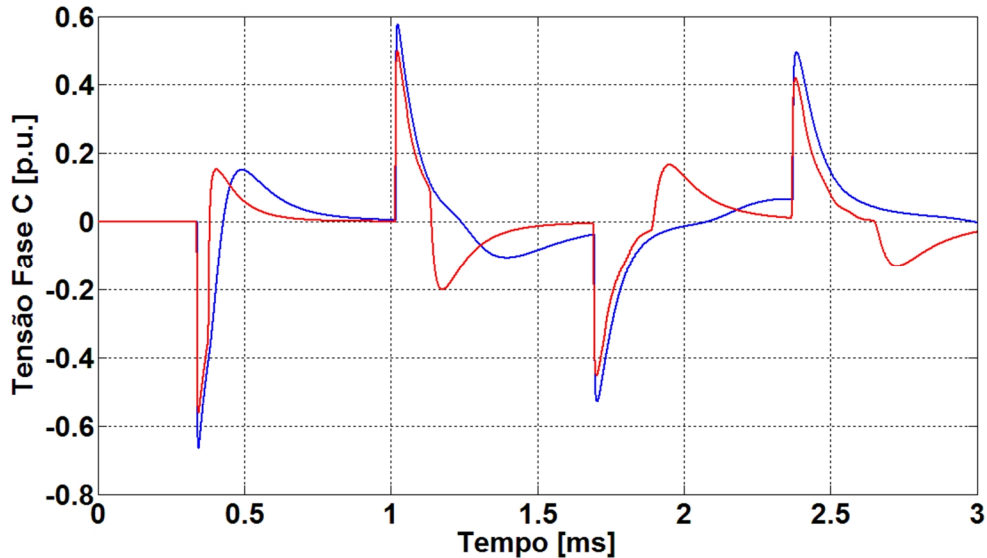


Figura 5.23. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 100 Ω .m: linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Nota-se que para as tensões induzidas, a configuração convencional tem maiores magnitudes. Fato que pode ser explicado pelo distanciamento dos condutores das fases, em que, a configuração não-convencional apresenta condutores mais afastados, tendo por isso tensões induzidas com menores valores.

A Figura 5.24 mostra a mesma análise para a resistividade do solo de 1000 Ω .m.

Já a Figura 5.25 apresenta as tensões induzidas para a resistividade do solo de 1000 Ω .m.

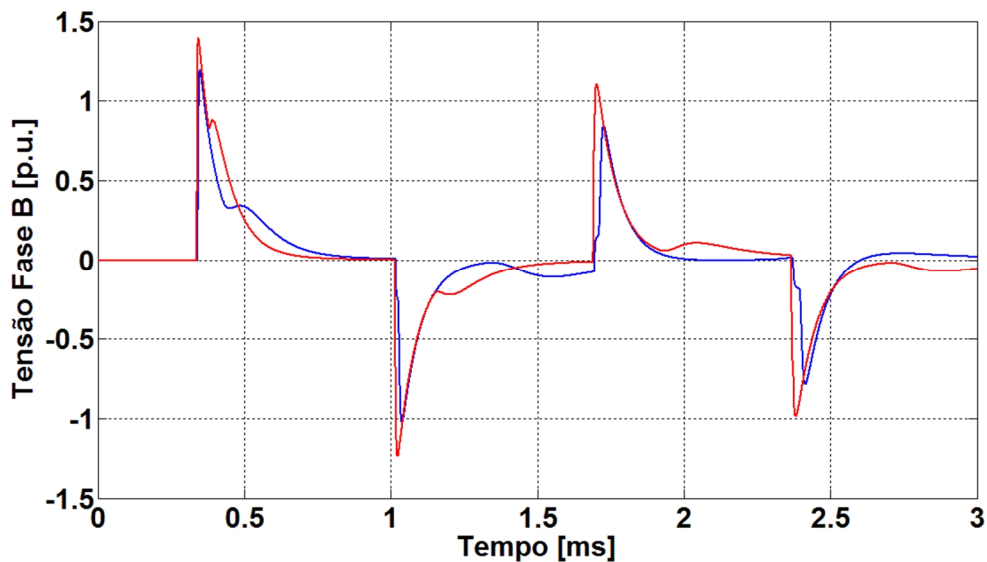


Figura 5.24. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

O mesmo comportamento observado para a resistividade do solo de 100 $\Omega.m$ (Figura 5.22) é visto na Figura 5.24. Apresentando diferença nas reflexões posteriores, que são mais atenuadas em consequência da maior resistividade do solo.

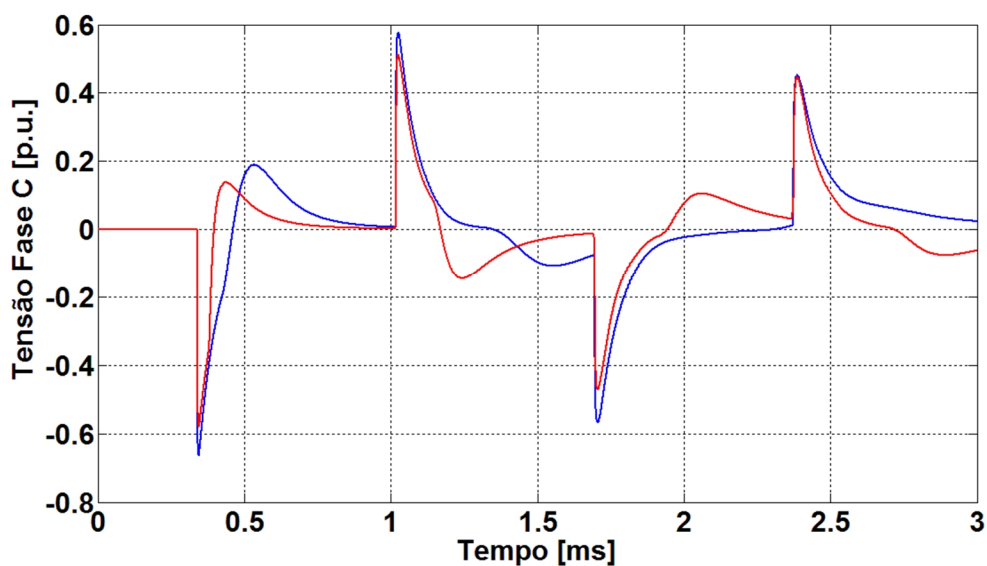


Figura 5.25. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Nota-se na Figura 5.25 o mesmo comportamento mostrado na Figura 5.23 com maior atenuação. É possível observar que com o aumento da resistividade do solo as tensões induzidas para as duas configurações apresentam valores mais próximos.

A Figura 5.26 apresenta a tensão no final da linha para a resistividade do solo de 10000 $\Omega.m$.

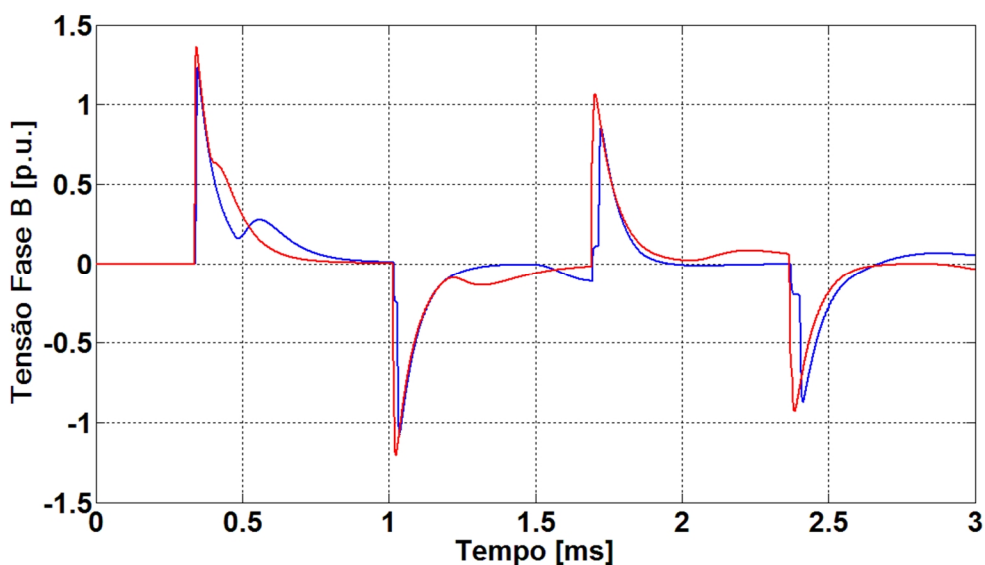


Figura 5.26. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 10000 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Há uma aproximação dos sinais de tensão medidos para as duas configurações, como sinalizado para a resistividade do solo de 1000 $\Omega.m$. Pode-se notar também uma maior atenuação dos valores de tensão.

A Figura 5.27 mostra o comportamento das tensões induzidas no final da linha de transmissão, para a mesma resistividade do solo da Figura 5.26.

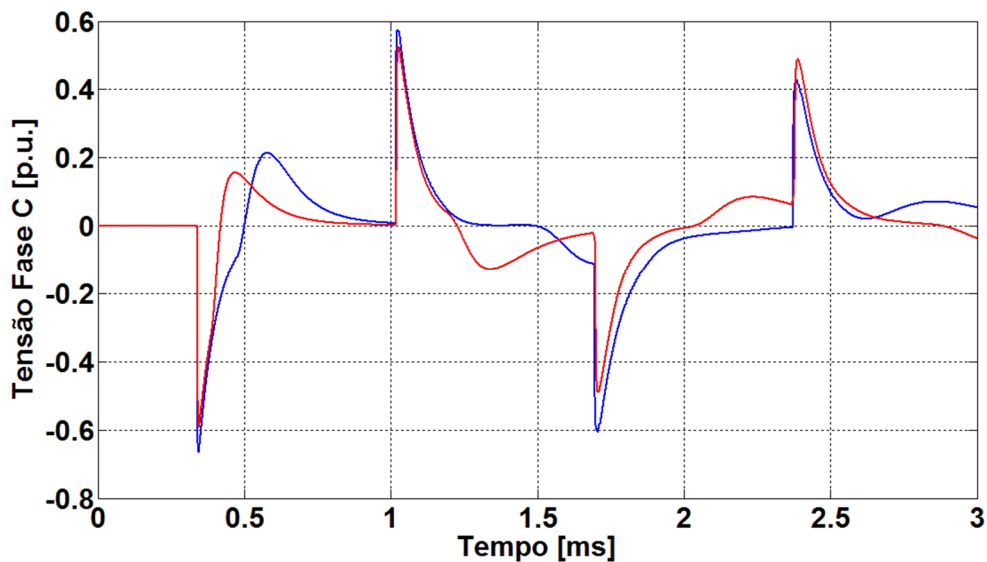


Figura 5.27. Tensão na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 10000 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

A próxima análise foi observar como cada configuração muda com a variação das resistividades do solo anteriormente aplicadas.

Primeiramente foram observados os resultados para a configuração convencional, mostrados na Figura 5.28.

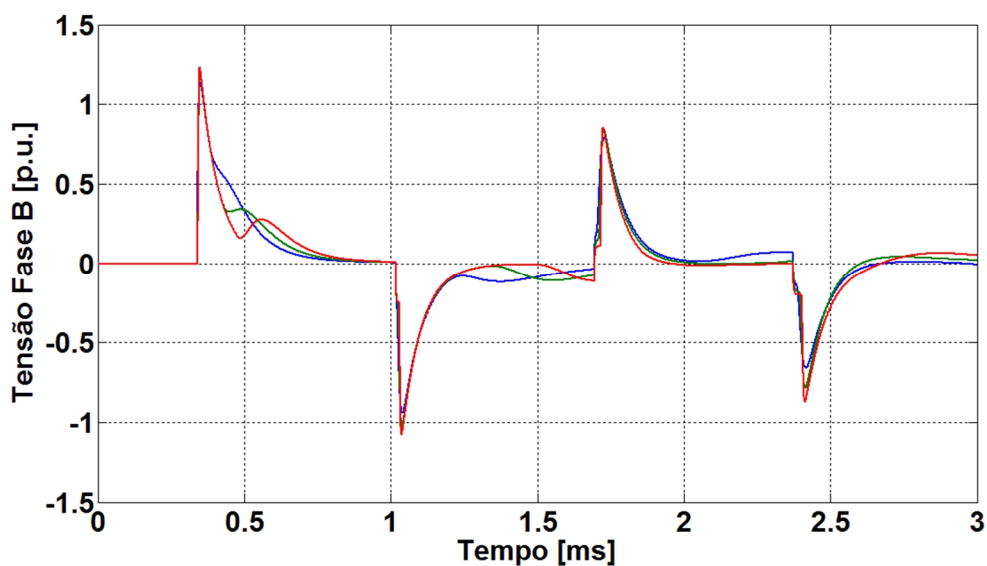


Figura 5.28. Tensão na saída da linha convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

Pode-se observar que para o sinal exponencial quase não há a variação dos picos de tensão nas reflexões. Sendo que a maior resistividade do solo apresenta menores oscilações, quando comparada com as demais.

A Figura 5.29 apresenta as tensões induzidas em uma das fases em que o sinal de tensão não foi aplicado.

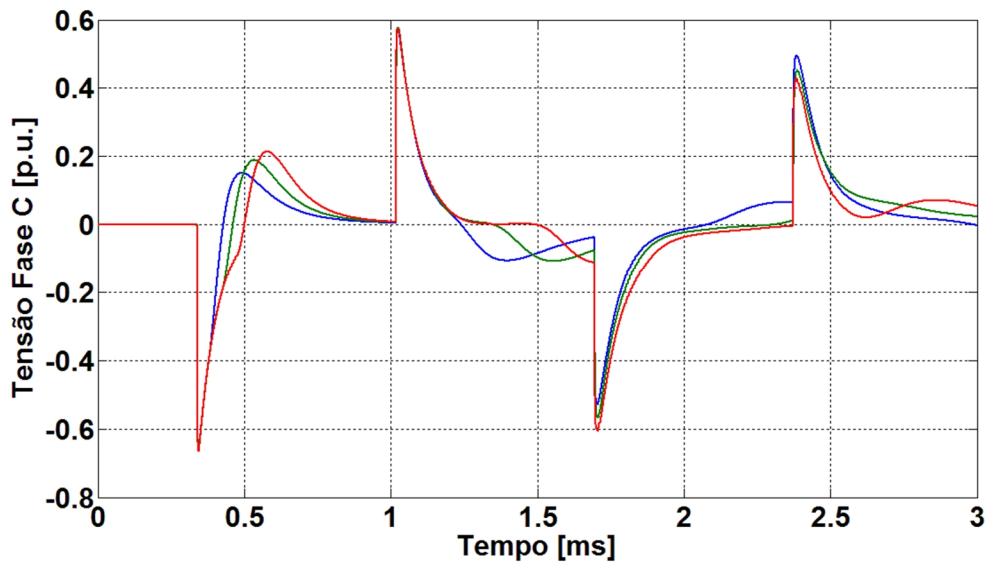


Figura 5.29. Tensão na saída da linha convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

As tensões induzidas nesse caso mostram que o aumento da resistividade do solo causa um atraso na atenuação após a primeira reflexão. Apresentando, novamente, a maior resistividade do solo menores oscilações.

Após a observação das tensões para a configuração convencional, seguem os resultados para a linha não-convencional, representados na Figura 5.30.

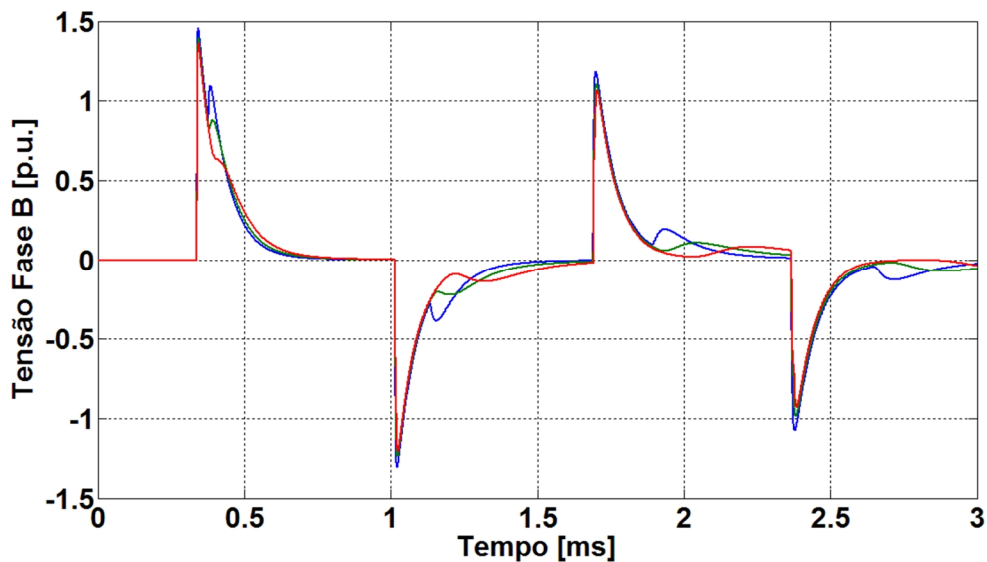


Figura 5.30. Tensão na saída da linha não-convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

Nota-se para essa figura que menores resistividades do solo apresentam maiores picos de tensão para toda a janela de tempo simulada. O que mostra como a altura das torres torna a linha mais sensível a variações da resistividade do solo.

A Figura 5.31 mostra as tensões induzidas em uma das fases não energizadas.

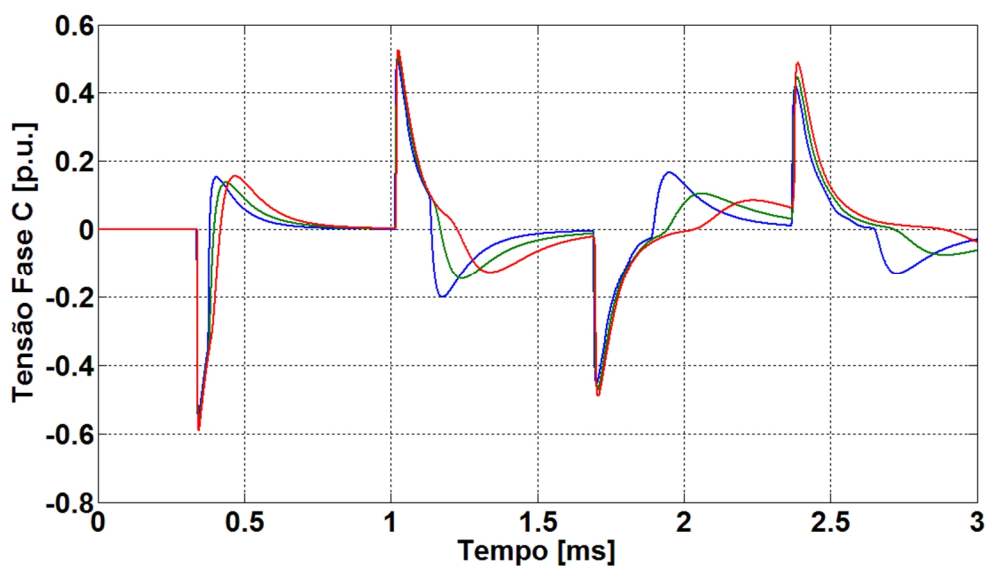


Figura 5.31. Tensão na saída da linha não-convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

Pela observação da Figura 5.31 pode-se notar que as tensões induzidas apresentam comportamento oposto ao apresentado para a fase onde o sinal foi aplicado. Em que, a maior resistividade do solo apresenta o maior pico de tensão.

5.3.2 Receptor em Curto-Circuito

Finalizando os resultados apresentados nesse capítulo, apresentam-se os sinais de corrente para a o sinal exponencial aplicado no início da linha, e medindo-se o sinal no final da mesma. Para a fase em que se aplica o sinal, bem como em uma das fases não energizadas.

A Figura 5.32 apresenta o resultado das duas configurações, para a resistividade do solo de $100 \Omega.m$.

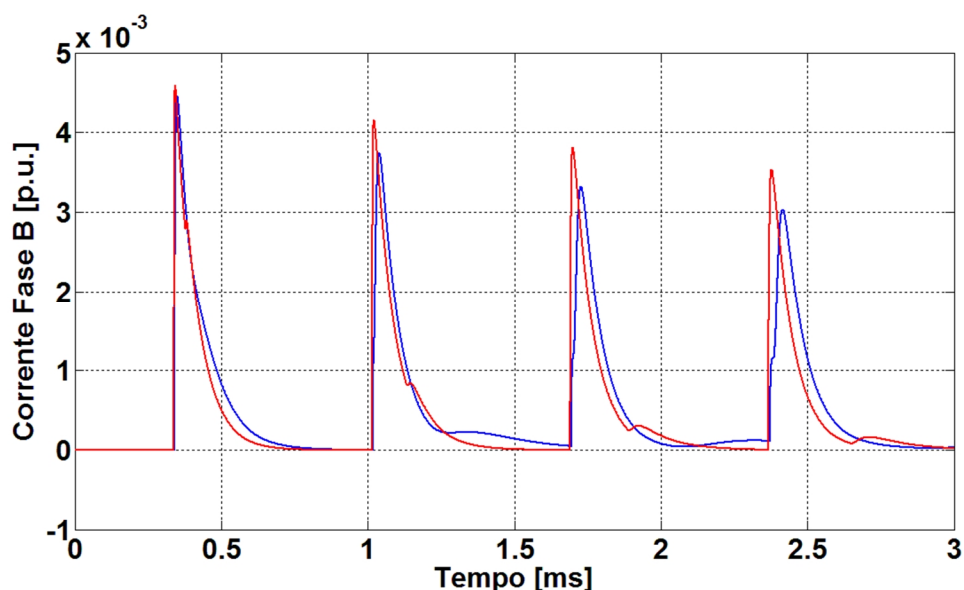


Figura 5.32. Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de $100 \Omega.m$: linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Pode-se observar que a configuração não-convencional apresenta maiores picos de corrente para todas as reflexões. Tendo também menores oscilações entre reflexões. Além da presença de um pequeno atraso nas reflexões da linha convencional em comparação com a configuração não-convencional.

A Figura 5.33 apresenta os resultados das correntes induzidas em uma das fases não energizadas.

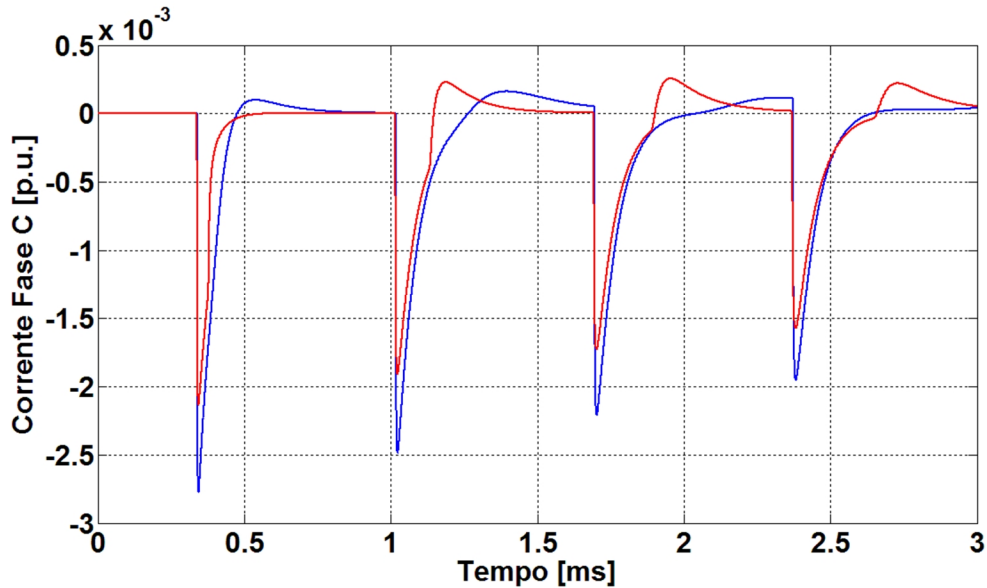


Figura 5.33. Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 100 Ω .m: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Observa-se que a corrente induzida nessa fase, para a configuração convencional, é maior em magnitude quando comparado com a linha não-convencional. Pois a influência do termo mútuo nessa configuração é menor.

Seguindo as apresentações tem-se na Figura 5.34 as correntes induzidas das duas configurações para a resistividade do solo de 1000 Ω .m.

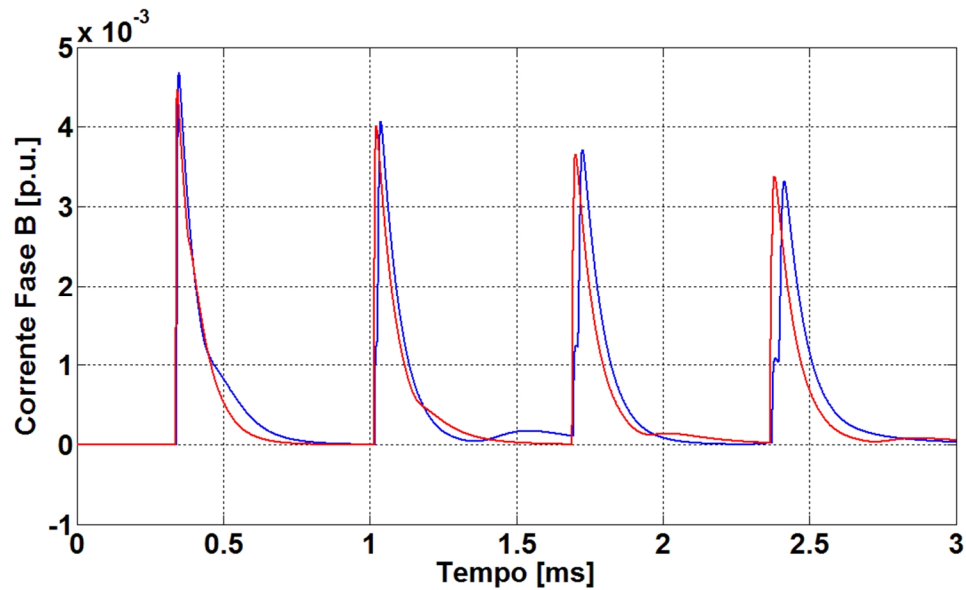


Figura 5.34 Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 1000 Ω .m: Linha não-convencional (curva em vermelha) e linha convencional (curva azul).

Observa-se a tendência das correntes das duas composições de torres se tornarem próximas. Além de ser mantida a tendência do atraso das reflexões da linha convencional.

A Figura 5.35 apresenta as correntes mútuas para as duas configurações de torres para a resistividade do solo de 1000 Ω .m.

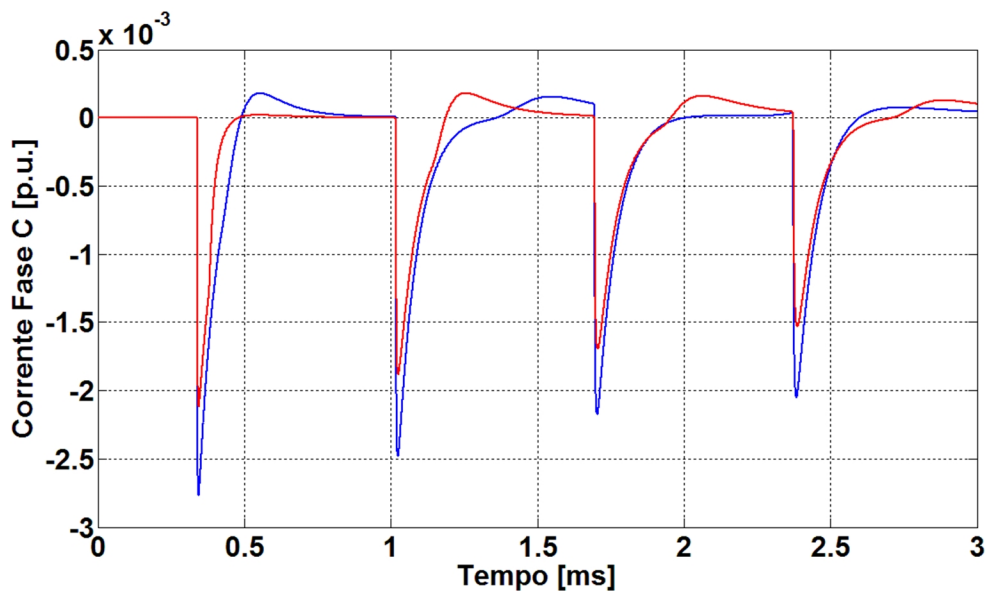


Figura 5.35. Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 1000 Ω .m: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Nota-se que a corrente da configuração não-convencional apresenta menor magnitude e oscilações quando comparado com a linha convencional.

A Figura 5.36 apresenta as correntes das duas configurações analisadas para a resistividade do solo de 10000 $\Omega.m$.

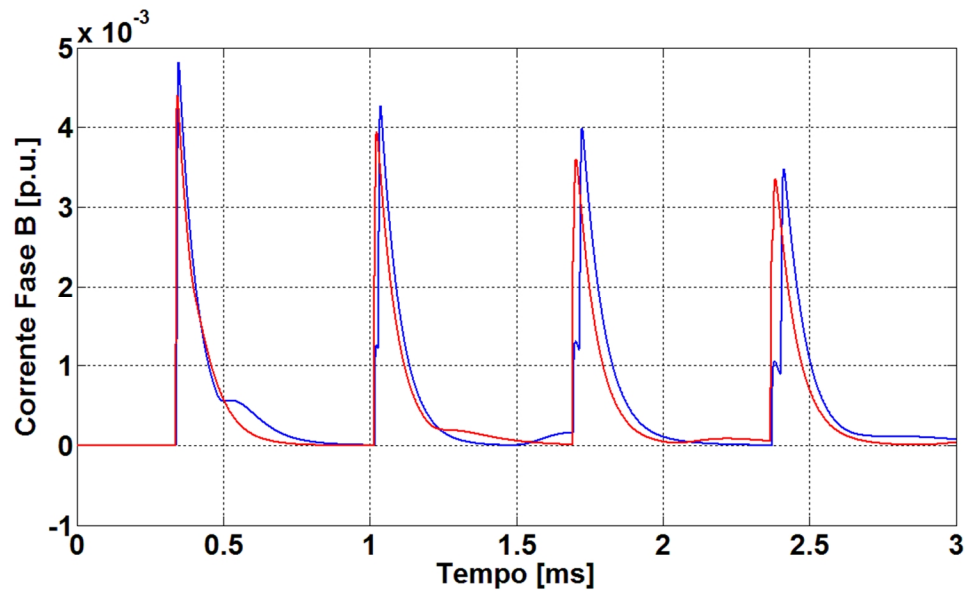


Figura 5.36 Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 10000 $\Omega.m$: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Pela observação da Figura 5.36, pode-se notar que há uma inversão nas magnitudes das correntes, sendo o valor de corrente da configuração convencional maior que a da não-convencional, já para a primeira reflexão. Mostrando como a resistividade do solo influencia nas magnitudes para esse sinal de aplicação.

A Figura 5.37 mostra a variação das correntes induzidas nas configurações para a resistividade do solo de 10000 $\Omega.m$.

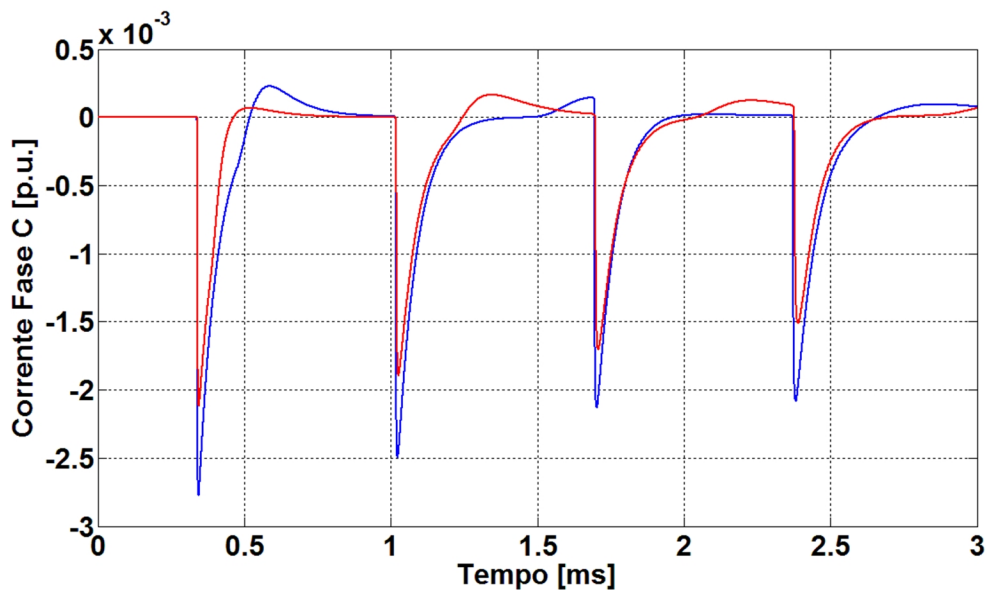


Figura 5.37. Corrente na saída da linha de transmissão para resistividade do solo de 10000 Ω .m: Linha não-convencional (curva vermelha) e linha convencional (curva azul).

Na Figura 5.37 nota-se a manutenção da tendência apresentada pela tensão induzida para as demais resistividades do solo previamente mostradas.

Como última análise apresenta-se os valores das correntes para as duas configurações mostradas de forma separada, para as resistividades do solo anteriormente estudadas no trabalho.

A Figura 5.38 mostra a corrente medida no final da linha da fase de aplicação do sinal.

A Figura 5.39 apresenta as correntes induzidas através da linha de transmissão para as três resistividades do solo.

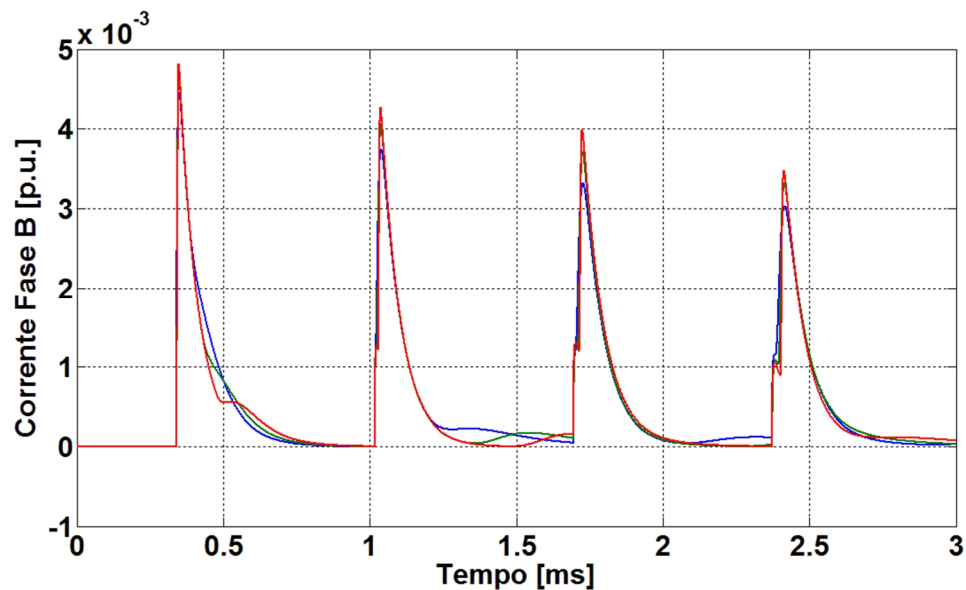


Figura 5.38. Corrente na saída da linha convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

Nota-se que a corrente da linha convencional apresenta maior magnitude para a resistividade do solo mais elevada. Apresentando, também, menores oscilações entre reflexões sucessivas.

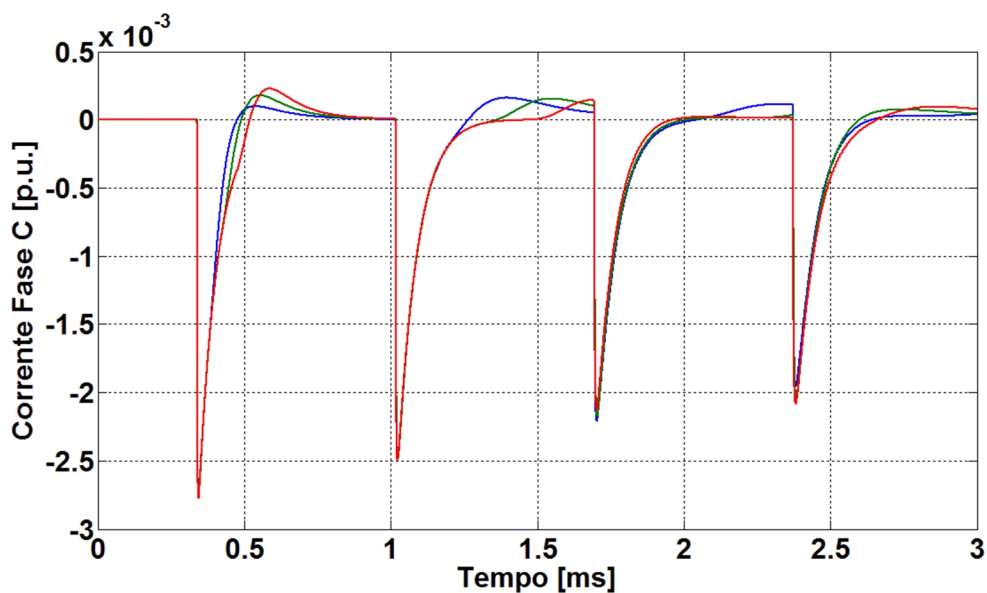


Figura 5.39. Corrente na saída da linha convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

Pela observação da Figura 5.39, é possível concluir que as correntes induzidas na configuração convencional não apresentam mudanças com relação ao pico da reflexão. Mostrando diferenças apenas nas oscilações entre reflexões.

A Figura 5.40 apresenta a variação da corrente medida no fim da linha de transmissão não-convencional.

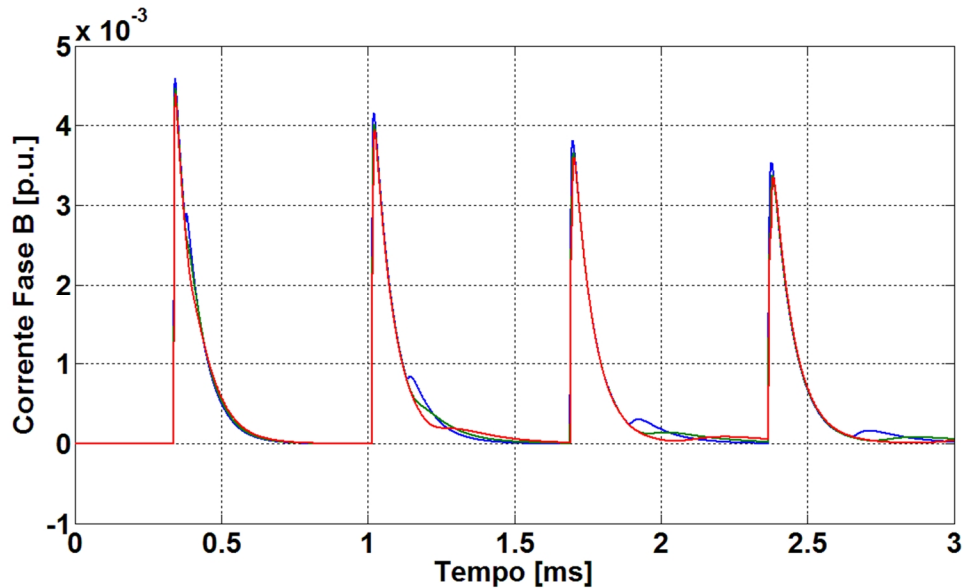


Figura 5.40. Corrente na saída da linha não-convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

Nesse caso, pode-se notar que a configuração não-convencional apresenta maiores variações nos picos de correntes para diferentes resistividades do solo. Em que, a menor resistividade do solo, faz o pico da reflexão ter maior magnitude.

A Figura 5.41 apresenta as correntes induzidas em uma das fases não energizadas para a configuração não-convencional.

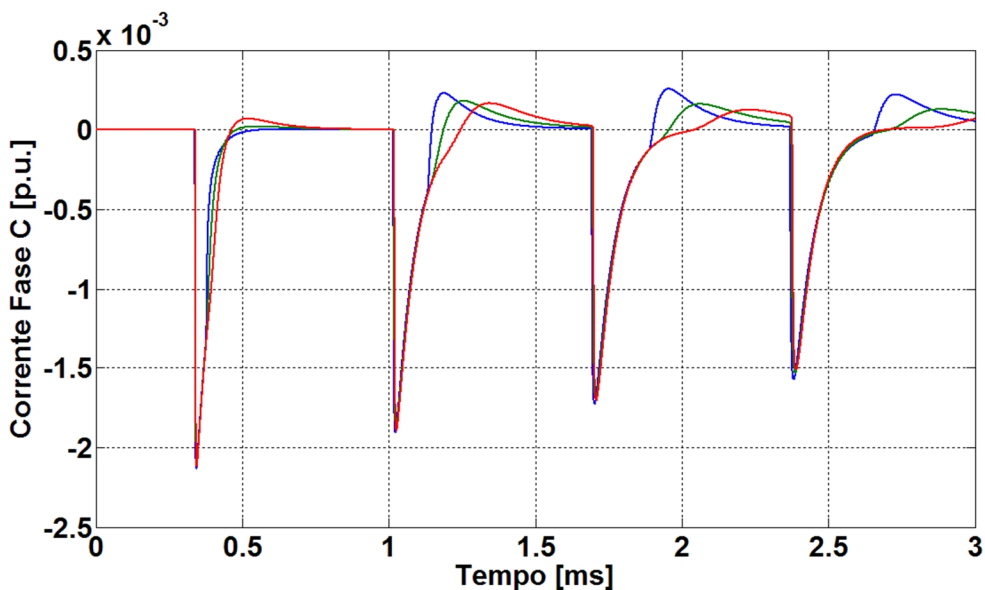


Figura 5.41. Corrente na saída da linha não-convencional para resistividades do solo de: Curva azul (100 $\Omega.m$), curva verde (1000 $\Omega.m$) e curva vermelha (10000 $\Omega.m$).

Observa-se que para as correntes induzidas a variação da resistividade do solo não representa grandes alterações nos picos das reflexões. E como para a configuração convencional, altera apenas as oscilações entre reflexões.

5.4 Conclusão

Nesse capítulo foi possível observar como os dois arranjos se comportam para diferentes sinais e resistividades do solo. Apresentando a configuração não-convencional uma maior dependência com relação a variação da resistividade do solo.

Outro fato importante foi a observação do comportamento dos acoplamentos mútuos. Que estiveram muito mais presentes na configuração convencional devido, sobretudo ao menor espaçamento entre os condutores das fases.

Pode-se concluir que a maior altura da estrutura de torre não-convencional leva o trecho de linha considerado a maiores sobretensões para solos com baixas resistividades.

Capítulo 6 Conclusão e Trabalhos Futuros

No corrente trabalho foram descritos, primeiramente, dados da atual configuração do sistema de transmissão nacional. Bem como peculiaridades das linhas interligadas a esse sistema. Ademais, breves descrições técnicas foram apresentadas sobre os principais componentes de linhas de transmissão convencionais, tais como: condutores múltiplos, isoladores e anéis anti-corona. Tendo, por finalidade proporcionar maior familiaridade com o tema em estudo.

No decorrer do estudo, a criação de um novo modelo de torre metálica com altura perto de 300 metros, é citada. Pois pode varrer grandes vãos, diminuindo a faixa de servidão, que fica confinada a apenas a base das torres. Complementando assim, os esforços para uma maior eficiência no transporte de energia sem perder de vista a questão ambiental.

Após isto, foi descrito o procedimento usualmente aplicado para o cálculo dos parâmetros elétricos de uma linha polifásica genérica. Para a observação do desempenho dos parâmetros elétricos das duas configurações de linha de transmissão frente a variação de frequência.

Os resultados do cálculo dos parâmetros elétricos das linhas mostraram a influência da altura na composição da indutância e resistência, para uma mesma resistividade do solo. Apresentando a linha não-convencional uma resistência e indutância menores quando comparada com a configuração convencional. Tal fato leva a crer que as torres mais elevadas além de estarem mais dispostas a descargas atmosféricas, estão sujeitas também, a maiores sobretensões e sobrecorrentes por possuírem menores atenuações devido aos parâmetros observados no estudo.

Foi observado que a variação tanto na resistência quanto na indutância ocorre na parcela que leva em conta o efeito do solo. Fenômeno que pode ser explicado pelas equações matemáticas presentes na teoria de cálculo de parâmetros elétricos que mostram a dependência dessa parcela com relação à profundidade do condutor imagem, que possui a mesma altura do condutor real acima do solo.

Ainda no domínio da frequência foi observado como a variação da resistividade do solo afeta os parâmetros elétricos das duas configurações. Os resultados mostraram que para os dois arranjos o aumento da resistividade do solo leva a um crescimento das magnitudes dos parâmetros, havendo uma maior influência da variação da resistividade do solo na configuração

não-convencional de linha. Onde solos de baixa resistividade levam a menores valores calculados dos parâmetros elétricos. As resistências mostraram ao longo das simulações na frequência uma tendência menor a variação de sua magnitude quando comparada com as indutâncias, que se mostraram elementos mais sensíveis a variação da resistividade do solo, para os dois modelos de linhas estudados.

Após estudar as diferenças nos parâmetros elétricos em componentes de fase foi feita a análise em componentes simétricas, a fim de se observar como varia a função de propagação, resistência, indutância e a impedância característica nos modos desacoplados.

Os resultados mostraram a tendência da configuração não-convencional estar sujeita a sobretensões e sobrecorrentes mais elevadas que a linha convencional. Uma vez que apresenta valores mais baixos de resistência e função de atenuação, tanto em sequência positiva (regime permanente) quanto em sequência zero (curto-circuito). Tal fato mostra que mesmo para regime permanente a configuração não-convencional apresenta mais suscetibilidade a sobretensões e sobrecorrentes. Além da maior probabilidade dessa torre, pela altura, tornar o trecho da linha mais sensível a descargas atmosféricas.

Por fim foi estudado o comportamento das duas configurações no domínio do tempo. Para isso dois tipos de testes foram realizados: receptor em aberto e em curto-circuito. E dois sinais de entrada foram estudados: degrau e exponencial.

O desempenho dos dois arranjos foi analisado primeiramente para o sinal de entrada em forma de degrau unitário. Pôde-se observar que a configuração não-convencional apresentou sinais no final da linha com valores de tensão que alcançaram quase duas vezes a magnitude do sinal de entrada. Outro fato importante apresentado foi o tempo de subida do sinal de tensão, observado na configuração não-convencional, que se mostrou bastante alto. Tal fato leva essa configuração a apresentar sobretensões por um período de tempo maior quando comparado com a linha convencional. Ainda tratando das linhas não-convencionais, foi possível observar que essa apresenta menores atenuações para as reflexões sucessivas. Confirmando a análise feita no domínio da frequência.

O comportamento para o sinal de entrada de forma exponencial mostrou o comportamento das configurações para transitórios de tensão mais rápidos. Tendo novamente a magnitude do sinal aplicado 1 pu.

A observação do comportamento dos acoplamentos mútuos foi outro aspecto bastante analisado. E estiveram presentes com maior intensidade na configuração convencional devido, sobretudo ao menor espaçamento entre os condutores das fases. Fazendo com que as tensões induzidas nos condutores não energizados tivessem magnitudes razoavelmente elevadas.

Encerrando as análises no domínio do tempo foi observado como a variação da resistividade do solo, influi na operação das linhas estudadas. Os resultados mostraram que a configuração não-convencional sofre maior influência da variação da resistividade do solo, apresentando maiores sobretensões para solos de baixas resistividades.

O presente trabalho mostrou que as torres não-convencionais, que podem compor trechos de linhas de transmissão no norte do país, podem estar mais sujeitas a sobrecorrentes e sobretensões. Estas provenientes tanto de descargas atmosféricas quanto de surtos ocasionados por manobras rotineiras do sistema. Buscando assim dar uma visão geral sobre o comportamento dessas torres para transitórios eletromagnéticos e sobre seus parâmetros elétricos.

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se indicar alguns aspectos a serem analisados:

- Considerar a influência da camada de vegetação sob o trecho de linha em que as torres não-convencionais serão aplicadas;
- Análise de custo e impacto de desempenho em termos dos isoladores, pára-raios, etc.
- Simulação considerando a linha de transmissão mista. Composta pelos trechos elevados.

Referências Bibliográficas

- [1] Kurokawa, S. e Pissolato, J., “Parâmetros Longitudinais e Transversais de Linhas de Transmissão Calculados a partir das Correntes e Tensões de Fase” *Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2003.*
- [2] Fuchs, R. D., “Transmissão de Energia Elétrica: Linha Aéreas; teoria das Linhas em Regime Permanente”, 2^a edição, Editora livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, R.J., 1979.
- [3] ONS. “Operador Nacional do Sistema Elétrico”, Acessado em: 2/8/2010 no endereço: <http://www.ons.org.br/>.
- [4] CTEEP. “Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista”, Acessado em: 2/8/2010 no endereço: <http://www.cteep.com.br/>.
- [5] Daltin, R. S., “Representação Modal Alternativa de Linhas de Transmissão Trifásicas Simétricas não Idealmente Transpostas” *Tese de Mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, Brasil, 2006.*
- [6] CEPEL. “Centro de Pesquisas de Energia Elétrica”, Acessado em: 2/8/2010 no endereço: <http://www.cepel.br/~lpne/index.htm/>.
- [7] Stevenson , W. D., “Elementos de análise de sistemas de potência”, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, S.P., 1978.
- [8] Hofmann, L., “Series expansions for line series impedances considering different specific resistances, magnetic permeabilities, and dielectric permittivities of conductors, air, and ground.”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, N° 2, 2003, págs. 564-570.
- [9] Dwight, H. B., “Mathematical Tables”, Dover Publ., Nova York, 1958.

- [10] McLachlan, N. W., “Bessel Functions for Engineers” 2^a edição, Clarendon Press, Oxford, 1955.
- [11] Deri, A., Tevan, G., Semlyen, A. E. e Castanheira, A., “The Complex Ground Return Plane – A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, N° 8, agosto 1981, págs. 3686-3693.
- [12] Fuchs, R. D., Almeida, T. M., “Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão”, Editora da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, M.G., 1982.
- [13] “Alimak Hek”, Acessado em: 5/8/2010 no endereço: <http://www.alimakhek.com/>.
- [14] EPE. “Empresa de Pesquisa Energética”, Acessado em: 5/8/2010 no endereço: http://www.epe.gov.br/Transmissao/Paginas/Estudos_9.aspx/.
- [15] Puccinelli Jr., R. C. e Souza, C. R., “Compactação de Linhas de Transmissão e Critérios Relevantes para Determinação da Viabilidade de Implantação” *Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil*, 1992.
- [16] Regis Jr, O., Dart, F. C., Cruz, A. L. P., “Avaliação Comparativa das Concepções de Linhas de Potência Natural Elavada em 500 kV Utilizadas no Brasil”, *Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré*, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.
- [17] O.M.O Gatous and J. Pissolato, “Frequency-dependent skin-effect formulation for resistance and internal inductance of a solid cylindrical conductor”. *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, Vol. 151, No. 3, June 2004.